BLUE ENERGY

ZONNE-ENERGIE UIT WATER



Inhoud

Inleiding

De oplossing voor het milieuvriendelijk opwekken van energie is mogelijk dichterbij dan we denken. De traditionele manieren van duurzame energie opwekken zijn algemeen bekend: getijde-, zonne- en windenergie. Minder bekend is dat bij het mengen van zoet rivierwater en zout zeewater veel energie vrijkomt.
Blue Energy is het opwekken van elektriciteit uit het mengen van zoet en zout water. Duurzame productie, want de zon wordt gebruikt als bron van energie. En hierbij komen geen broeikasgassen vrij (zoals CO_2, NO_x en SO_x). Bovendien zijn de grondstoffen gratis en vrijwel ongelimiteerd. Ook heel belangrijk is dat de productie van de elektrische energie niet afhangt van externe factoren. Een Blue-Energy-centrale levert dag en nacht, bij mooi en bij slecht weer, zon of geen zon.
De technologie voor Blue-Energy is volop in ontwikkeling. Wie over de afsluitdijk richting Friesland gaat, rijdt bij Breezanddijk onder grote buizen door die over de weg lopen. Door een van de buizen loopt zout water uit de Waddenzee naar een Blue-Energy-proefcentrale aan de rechterkant. Door de andere buis gaat brak water van de proefcentrale naar de Waddenzee. Op satellietfoto's zijn de buizen goed te zien. Dat geldt ook voor de zoetwaterinlaat vanuit het IJsselmeer. De centrale neemt 220 m^3/h zeewater en 220m^3/h IJsselmeerwater in en heeft een vermogen van 10 kW. Als de centrale de hele dag op dat vermogen draait, wordt er per dag 240 kWh geproduceerd.



Figuur 1

Ter vergelijking: een gemiddeld huishouden gebruikt dagelijks ongeveer 10 kWh.
Bij Katwijk aan zee is een Blue-Energie centrale gepland met een vermogen van 1 MW. Vergelijkbaar met een niet al te grote windmolen (nieuwe windmolens op zee hebben een vermogen van 8MW).
Een commerciële centrale (200 MW) zou bijvoorbeeld kunnen staan bij de spuisluizen waar IJsselmeerwater in de Waddenzee stroomt.
De vraag die in deze module dan ook centraal staat is: Waar in Nederland liggen mogelijkheden voor zo`n Blue Energy centrale en welke bijdrage levert deze nieuwe vorm van energie aan de huidige energievoorziening?
Om deze vraag te kunnen beantwoorden ga je naar de onderliggende principes van Blue Energy kijken. Met behulp van de theorie krijg je inzicht in de techniek en het proces van Blue Energy.

Wat weet je aan het eind?

Voorkennis

Om deze module te kunnen uitvoeren heb je enige basiskennis uit de natuurkunde, scheikunde, wiskunde en aardrijkskunde nodig. Uit de natuurkunde zijn dat de grondbeginselen van kracht, druk, elektriciteit, energie en vermogen met de symbolen van deze grootheden en bijbehorende eenheden zoals kilowattuur, megawatt en joule (respectievelijk kWh, MW en J). Ook is kennis van de algemene gaswet gewenst.
Wat de scheikunde betreft moet je weten dat een zoutoplossing losse ionen bevat die een lading hebben, gelijk aan het elementair ladingskwantum e ($1,6 * 10^{-19}$ C). Je moet vertrouwd zijn met redoxreacties en kunnen rekenen met de eenheid mol en met de (meestal gebruikte) eenheid voor concentratie: mol L^{-1}.
Wat de wiskunde betreft moet je met logaritmes kunnen rekenen en weten wat een natuurlijke logaritme is (ln x).
Aardrijkskunde heb je nodig om iets te weten over het deltagebied dat Nederland is.

Leerdoelen

Na afloop van deze module kun je:

- klimaatproblemen benoemen en de positie van duurzame energie in Nederland omschrijven;
- natuurkundige en scheikundige verklaringen geven voor het verschijnsel dat energie vrijkomt bij het mengen van zoet en zout water;
- beschrijven hoe en waar deze energie kan worden omgezet in nuttige elektrische energie;
- beschrijven hoe de verschillende partijen bij het ontwikkelen van Blue Energy met elkaar moeten samenwerken en welke partijen dit betreft;
- na specialisatie in een keuzeonderwerp je bevindingen aan klasgenoten presenteren.

Verder beheers je de leerdoelen die aansluiten bij het door jou gekozen keuzeonderwerp (zie paragraaf 1.2).

Hoe werk je deze module door?

Deze module bestaat uit twee delen.
Een Algemeen Deel (hoofdstuk 1 t/m 6), een Verdiepingsdeel met specialisatie en eindopdracht (hoofdstuk 7).
Je werkt eerst met de hele klas het algemene deel door. Na deze inleiding volgen eerst twee hoofdstukken over het klimaatprobleem en verschillende vormen van duurzame energie. Hier volgt de eerste kennismaking met Blue Energy.
Hoofdstuk 1 gaat in op de vraag waarom gebruik van fossiele brandstoffen problematisch is.
Hoofdstuk 2 onderzoekt wat de mogelijkheden zijn van bronnen met hernieuwbare energie.
Hoofdstuk 3 legt uit wat Blue Energy is.
Hoofdstuk 4 legt uit hoe je m.b.v. Blue Energy elektriciteit kunt produceren.
Hoofdstuk 5 legt uit waar het vermogen van een Blue Energy centrale van afhangt.
Hoofdstuk 6 vormt het verdiepingsdeel van de module, waarin meerdere specialisaties aan bod komen. Deze verschillende specialisaties sluiten min of meer aan op één of meerdere van de vakgebieden natuurkunde, scheikunde en aardrijkskunde.

- Als je je specialiseert als ***planoloog*** leer je welke fysisch geografische factoren een rol spelen bij de locatiebepaling van een Blue Energy centrale. Je leert om een gegeven locatie te beoordelen op geschiktheid voor zo een centrale. Verder leer je hoe Blue Energy kan worden ingepast in de omgeving. Deze specialisatie sluit vooral aan bij het vakgebied ***aardrijkskunde***.
- Als je je specialiseert als ***milieudeskundige*** leer je hoe je een onderzoek kunt opzetten en uitvoeren, waarbij je verschillende condities onderzoekt van de watersamenstelling (zoutconcentratie bijvoorbeeld). Verder leer je welke consequenties dit heeft voor de toepassingsmogelijkheden van Blue Energy. Deze specialisatie sluit vooral aan bij de vakgebieden ***scheikunde en biologie***.
- Als je je specialiseert als ***technisch ingenieur*** leer je hoe je een rekenmodel kunt opzetten om het vermogen van het systeem te berekenen. Op grond hiervan leer je te zoeken naar belangrijke parameters voor het verbeteren van het vermogen (optimalisatie). Verder leer je hoe je de resultaten kunt gebruiken voor verder onderzoek en het technische ontwerp. Deze specialisatie sluit vooral aan bij het vakgebied ***natuurkunde***.
- Als je je specialiseert als ***beleidsadviseur*** dan moet je van alle markten thuis zijn. Je leert communiceren met mensen uit totaal verschillende vakgebieden zoals de technisch ingenieur, de planoloog en de milieudeskundige. Je leert te kijken naar de grote lijn en van specialisten in korte tijd de essentiële informatie te verkrijgen. Uiteindelijk ben jij degene die de bijdragen van de anderen tot een geheel moet smeden.

Je kiest bij dit verdiepingsdeel, in overleg met je docent, voor een van de specialisaties. Leerlingen met dezelfde specialisatie vormen een groep. Iedere groep werkt zijn specialisatie af: samen proeven uitvoeren of opdrachten maken en het verslag van je specialisatie maken. Met PowerPoint presentaties en/of posters houden jullie elkaar op de hoogte van je resultaten. Let op: als je bepaalde gegevens mist, vraag dan nadere uitleg aan je klasgenoten die daar mee bezig zijn. Na afloop van de specialisatie geef je een presentatie aan je klasgenoten over je resultaten en conclusies. Ook beoordeel je je klasgenoten met behulp van een beoordelingsformulier.
Het afsluitende hoofdstuk 8 wordt weer door de hele klas uitgevoerd: samen met klasgenoten uit de twee andere specialisatiegroepen schrijf je een adviesrapport over Blue Energy.

Hoe word je beoordeeld?

Je wordt in deze module op twee manieren beoordeeld. De resultaten van je specialisatie presenteren jullie aan je klasgenoten. Je docent beoordeelt van je presentatie de inhoud, de manier van presentatie en je argumentatie. De docent kan hierbij eventueel ook gebruik maken van de beoordeling door je klasgenoten.
Aan het einde van de module zal er een algemene toets over het algemene deel en je specialisatie worden afgenomen.
De waardes voor de twee toets momenten worden bepaald door de docent.

Startopdracht: wat is jouw voetafdruk?

Ieder mens heeft recht op een plekje op deze wereld. Dat lijkt vanzelfsprekend. Maar de wereldbevolking groeit. Op dit moment zijn er 7,5 miljard inwoners. Dat worden er minstens 10 miljard. De vraag rijst hoe groot dat plekje moet zijn waar iedereen recht op heeft. Nederland heeft 17 miljoen inwoners. Zou je het oppervlak van Nederland kunnen delen door 17 miljoen om te weten wat een Nederlander nodig heeft aan ruimte om te kunnen leven?

Kan de planeet dat aan? Om uit te drukken hoeveel ruimte we werkelijk per persoon innemen, is het begrip ***ecologische voetafdruk of footprint*** geïntroduceerd.

In dat verband valt vaak het woord ***duurzaamheid***.
In deze module gaat het vooral om het gevaar voor uitputting van de aarde als gevolg van overbevolking. Anders gezegd: we verbruiken de aarde in plaats dat we haar gebruiken. Gebruik wil zeggen dat we de aarde in een zodanige toestand laten, dat ook volgende generaties er op een vergelijkbare wijze een bestaan kunnen vinden. We noemen dat duurzaam gebruik. Bij verbruik is dat niet het geval.

Opdracht 1 ecologische voetafdruk (►URL1)

a. Zoek uit wat bedoeld wordt met de ecologische voetafdruk of footprint
b. Bereken je eigen footprint met behulp van URL1.
c. Hoe groot is je voetafdruk in vergelijking met de gemiddelde Nederlander?
d. Hoeveel ruimte is er gemiddeld voor een bewoner op de aarde?
e. Leg uit of je, vergeleken met de gemiddelde ruimte voor aardbewoners, op ‘een grote voet’ leeft.
f. Een manier om je footprint te verkleinen is het gebruik van groene stroom.
Groene stroom is een vorm van duurzame energie, waarmee je het verbruik van fossiele energie beperkt.
   - Gebruiken jullie groene stroom?
   - Hoe wordt groene stroom opgewekt?
   - In welk geval is gas ook een vorm van duurzame energie?



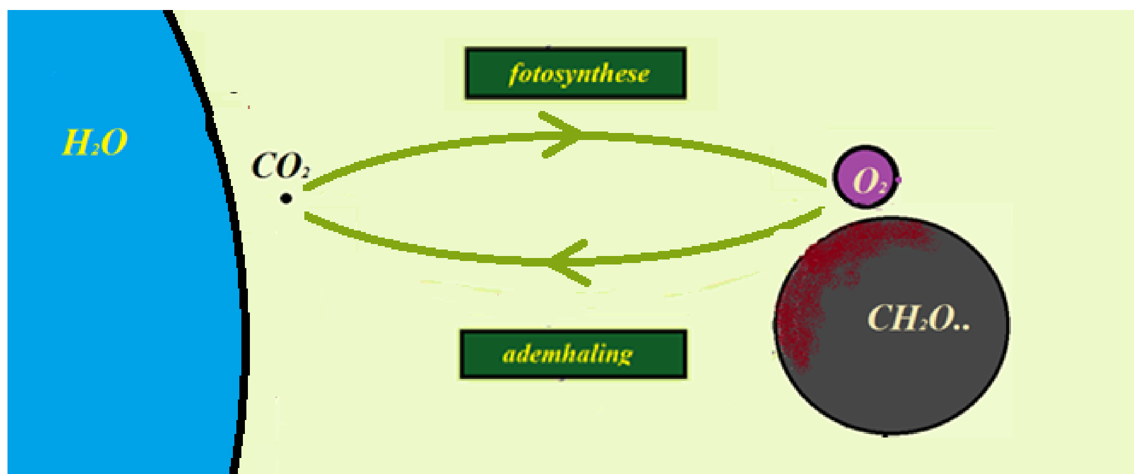
Hoofdstuk 1: Het CO_2-probleem

In dit hoofdstuk

- leer je de koolstofkringloop van het leven kennen;
- leer je dat het gebruik van fossiele brandstoffen deze kringloop verstoort;
- leer je de gevolgen van deze verstoring kennen.

1.1 De kringloop van het leven

Het grote samenlevingscontract van onze planeet betreft de uitwisseling tussen planten en dieren. Planten produceren glucose en zuurstof uit CO_2 en water met behulp van energie uit zonnestraling. Dieren hebben de stoffen nodig die de plant produceert en ook het afvalproduct zuurstof. Zij ademen zuurstof in en ademen CO_2 uit. In figuur 2 is deze uitwisseling van stoffen in beeld gebracht.



Figuur 2 De twee grote complementaire processen van het leven: ademhaling en fotosynthese.

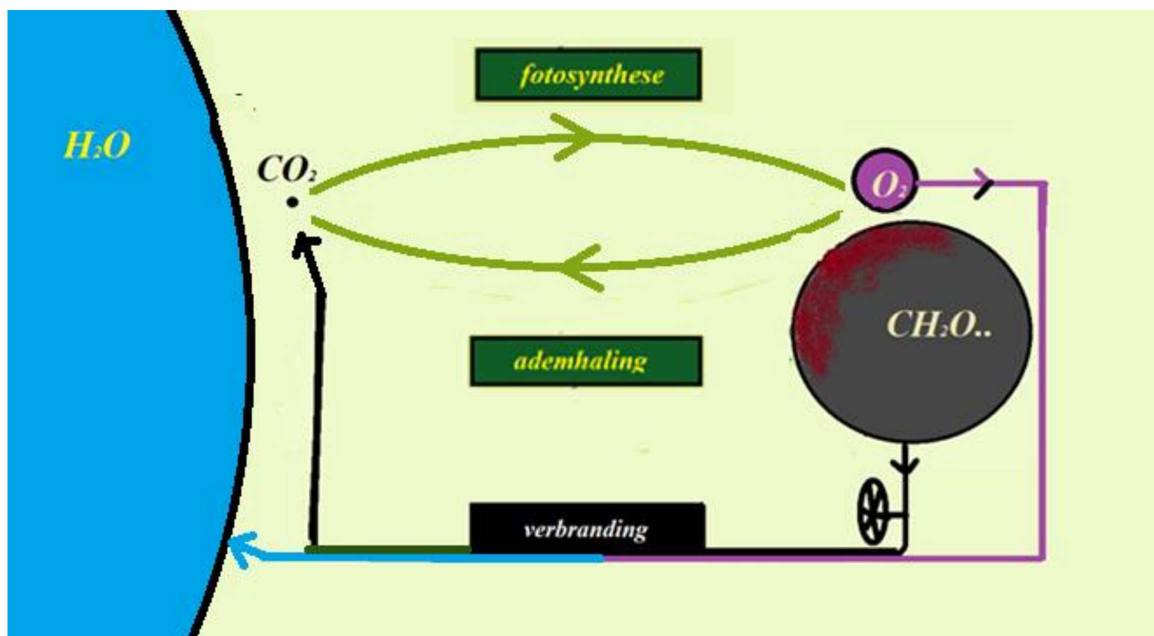
Fotosynthese

De fotosynthese is een proces waarbij uit CO_2 en water, glucose en zuurstof wordt geproduceerd. De zuurstof is een afvalproduct dat wordt opgenomen in de atmosfeer. De oudste sporen van dit proces (ontstaan van lagen geoxideerd ijzer) dateren van 2,7-2,8 miljard jaar geleden. De fotosynthese is begonnen bij een bepaalde cyanobacterie. Tegenwoordig vindt de fotosynthese voornamelijk plaats in plantencellen die daarvoor speciale organellen hebben: de groene bladgroenkorrels (chloroplasten).
In deze organellen wordt het zonlicht opgevangen in bijzondere antennecomplexen van chlorophyl. Het is intrigerend dat de chloroplasten hun eigen DNA hebben. Volgens de theorie van Lynn Margulis zijn deze organellen het product van endosymbiose. De organellen zouden afstammen van een cyanobacterie die zo'n 2,3 mld jaar geleden is samengesmolten met een cel die niet beschikte over een fotosysteem om energie te oogsten.

Ademhaling

De ademhaling is het omgekeerde proces van fotosynthese. Glucose wordt met behulp van zuurstof omgezet in CO_2 en water. De vrijkomende energie wordt opgeslagen in het molecuul ATP. Dit proces vindt voornamelijk plaats in de mitochondriën. Dit zijn organellen die voorkomen in zowel de dierlijke cel als de plantaardige cel. Ook de mitochondriën

hebben hun eigen DNA. De leden van het dierenrijk waartoe wij zelf behoren krijgen hun energie en bouwstoffen direct van planten of indirect van dieren die planten eten.
Als de fotosynthese het wint van de ademhaling nemen de hoeveelheid vrije zuurstof in de atmosfeer en de hoeveelheid koolwaterstoffen toe. De hoeveelheid CO_2 neemt af. In het grijze verleden is dat gebeurd. Toen zijn ook de immense reservoirs ontstaan van de fossiele brandstoffen (olie, gas en steenkool) aan de ene kant en de hoeveelheid vrije zuurstof in de atmosfeer aan de andere kant. In figuur 2 is het reservoir van organisch materiaal weergegeven als CH_2O…Het grootste deel van dat reservoir is fossiel. Maar een deel van dit reservoir wordt gevormd door biomassa, organisch materiaal dat in deze tijd is gevormd. Ook je eigen massa (met uitzondering van water) maakt deel uit van dit reservoir.
Figuur 2 illustreert hoe belangrijk CO_2 is voor het leven waar wij toe behoren. Zonder dit molecuul zouden we niet bestaan. Tegelijkertijd valt op hoe klein het reservoir van atmosferisch CO_2 is ten opzichte van de andere reservoirs. Lange tijd hebben de twee processen ademhaling en fotosynthese elkaar gemiddeld in evenwicht gehouden. Maar met het begin van de industriële revolutie is er een nieuwe situatie ontstaan. De mens ontdekte de fossiele brandstoffen. Er ontstond een derde stroom. In figuur 3 is die in beeld gebracht.

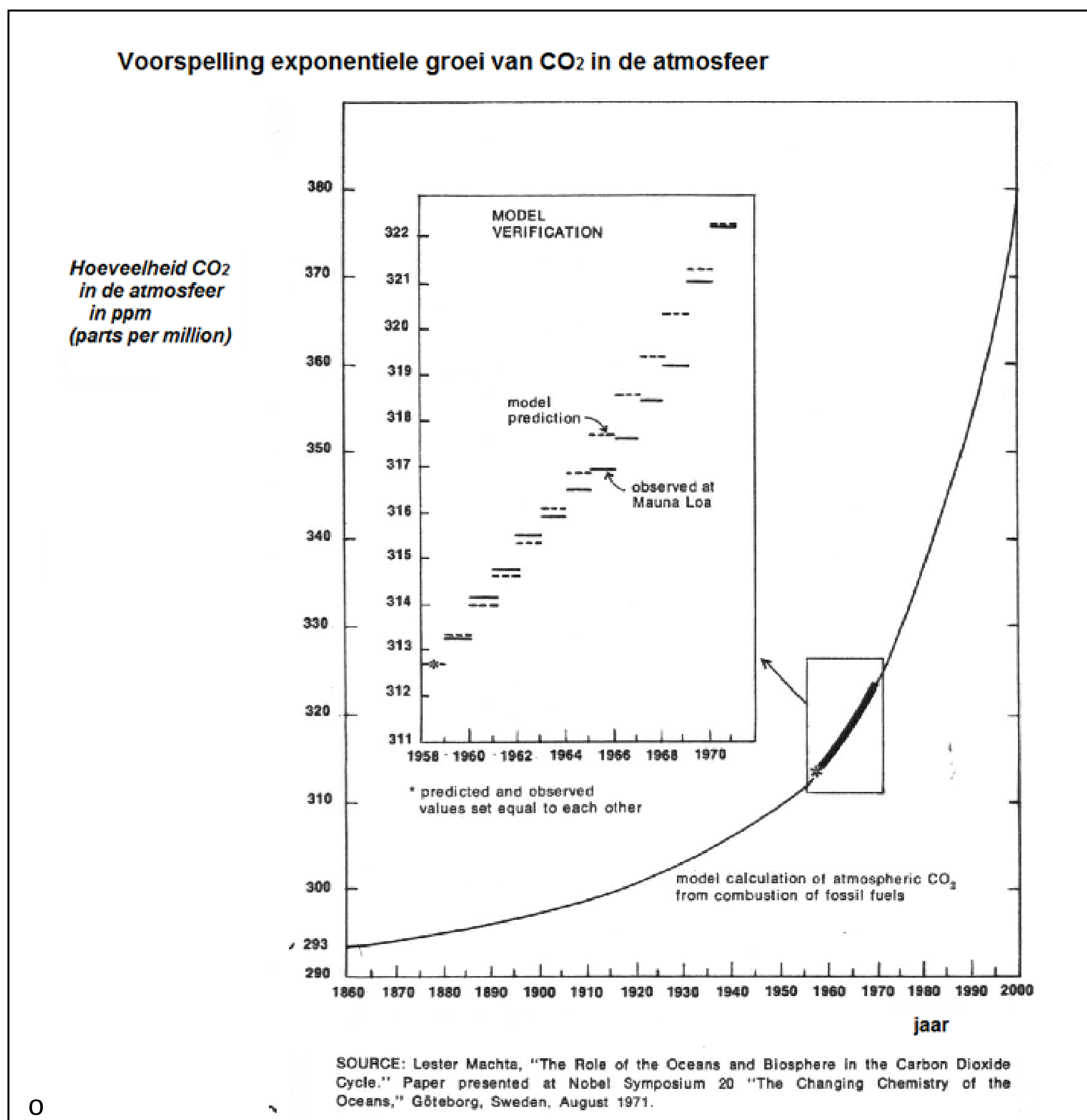


Figuur 3 Rechtstreekse verbranding van fossiele brandstoffen brengt extra CO_2 in de atmosfeer.

De club van Rome

In 1972 bracht een groep verontruste wetenschappers uit Europa een rapport uit waarin zij een samenhangend beeld schetsten van een aantal problemen die zich wereldwijd voordeden. Zij wezen er op dat door de almaar uitdijende wereldbevolking en het wereldwijde streven naar economische groei de grondstoffen in de wereld zouden opraken en de vervuiling onbeheersbaar zou worden. De Club van Rome, zoals de groep zich noemde, wist aandacht te trekken voor de ongemakkelijke boodschap. Het rapport met de veelzeggende naam ***"the limits to growth"*** veroorzaakte ophef in de hele wereld. De paniek werd nog eens versterkt door de oliecrisis in 1973 toen oliesjeiks de oliekraan

dichtdraaiden. In de jaren daarna verdween de paniek. Op meerdere punten bleken de voorspellingen van de Club niet uit te komen. Met name de voorspelling dat de voorraden fossiele brandstoffen snel uitgeput zouden raken bleek geen steek te houden. Veel meer landen bleken te beschikken over reserves olie, gas en steenkool. De oliesjeiks verloren hun macht. Ook de succesvolle aanpak van een aantal gifschandalen maakte dat het optimisme terugkeerde. En tenslotte bleek ook het wereldvoedselvraagstuk oplosbaar. De technologische vooruitgang maakte een explosieve toename mogelijk van de hoeveelheid voedsel die een hectare grond kon voortbrengen. Het liep allemaal zo'n vaart niet. Helaas trokken velen de verkeerde conclusie dat de centrale boodschap van de Club van Rome dus onjuist was gebleken. Maar de grenzen aan de groei bleken toch te bestaan…!
Door de nadruk die was komen te liggen op de omvang van de beschikbare grondstoffen heeft een voorspelling van de Club van Rome helaas onvoldoende aandacht gekregen. Het betreft de voorspelling van de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer. Figuur 4 brengt die voorspelling in beeld.



Figuur 4 Voorspelling van de Club van Rome op basis van metingen van het Mauna Loa Observatorium. De Club voorspelde dus in 1972 dat in 2000 de hoeveelheid CO_2 377 ppm zou bedragen.

Opdracht 2
Als de toename van een grootheid in de tijd evenredig is met de waarde van de grootheid dan is er sprake van exponentiële toename.

$$dA \coloneqq constante * A * dt$$

De toename dA is evenredig met A en met de tijdsduur dt. Iets herschrijven levert op:

$$\frac{dA}{dt} = k * A$$

Hier staat een zogenaamde differentiaalvergelijking: een vergelijking waarin zowel een grootheid als zijn afgeleide voorkomen.

$$A'(t) = kA(t)$$

De oplossing van deze vergelijking is een exponentiële functie.

$$A(t) = A_0 e^{kt}$$

Volgens de club van Rome was de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer zo'n functie van de tijd. De waarde van de groeifactor k zoals die door de Club van Rome voor de toename van CO_2 werd bepaald met behulp van de metingen van het meetstation Mauna Loa. Kan worden gehaald uit de grafiek.

a. Lees met behulp van figuur 2 af wat het gemiddeld aantal ppm CO_2 in het jaar 1958 was.
b. Trek een raaklijn in 1958 aan de grafiek en bepaal de richtingscoëfficiënt van de raaklijn in ppm/jaar.
c. Hoeveel ppm is er in een jaar 1958 bijgekomen?
d. Hoe groot is de procentuele jaarlijkse groei?
e. Bepaal met a en c de constante k.

Het is ook mogelijk k te bepalen met behulp van de functie. Als nulpunt van de tijd kiezen we het jaar 1860.

f. Hoe groot zijn t en A in het jaar 1860 en 2000?
g. Bereken de waarden van k door gebruik te maken van de exponentiële functie en de waarden van A op t = 0 en t = 140.
h. Komen de uitkomsten van d en f overeen?

Voor grootheden die jaarlijks met hetzelfde percentage groeien is er een vaste verdubbelingstijd. Met behulp van de constante k kan worden bepaald wat de verdubbelingstijd is. Er geldt:

$$Verdubbelingstijd = \frac{ln2}{k}$$

i. Bereken de verdubbelingstijd van het aantal ppm CO_2 in de atmosfeer uitgaande van k=0,002

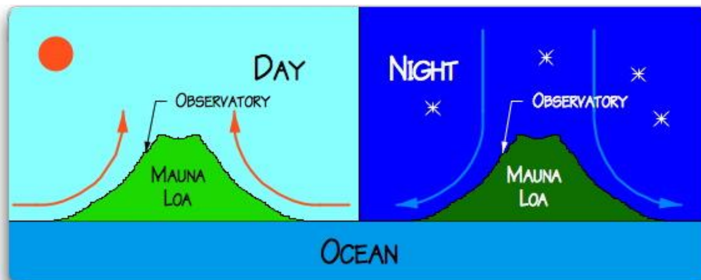
Het Mauna Loa Observatorium.

De Club van Rome baseerde zijn voorspellingen op metingen van het Mauna Loa Observatorium dat gelegen is op de noordelijke helling van de vulkaan Mauna Loa op Hawaï. Het Mauna Loa Observatorium valt onder beheer van NOOA (National Oceanic and Atmospheric Administration), een wetenschapsbureau van het Amerikaanse ministerie van Handel.



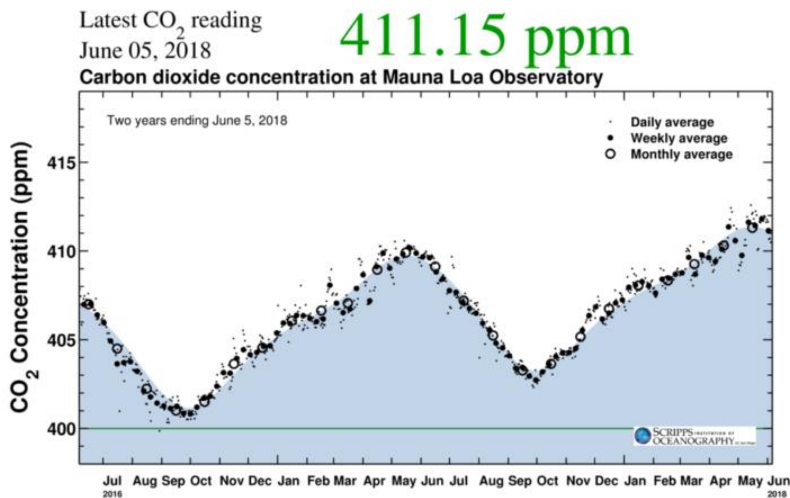
Figuur 5 Het Mauna Loa Observatorium in Hawaï, gelegen op de noordelijke helling van de Mauna Loa vulkaan met uitzicht op de noordelijk gelegen Mauna.

De eerste nauwkeurige metingen van de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer werden rond 1958 gedaan door David Keeling, een jonge geochemicus die daarvoor een methode had ontwikkeld. Het vermoeden bestond dat het gebruik van fossiele brandstoffen zou kunnen leiden tot een toename van de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer. Voor zijn metingen zocht Keeling naar een locatie waar lokale invloeden de meetresultaten niet zouden kunnen beïnvloeden. Big Island, het grootste eiland van Hawaï, bleek een ideale standplaats omdat het middenin de Grote Oceaan ligt ver weg van de verstorende invloed van menselijke activiteit maar ook van bosrijke gebieden. Het meetstation bevindt zich op de noordelijke helling van de vulkaan Mauna Loa op een kaal terrein zonder noemenswaardige vegetatie. ‘s Nachts stroomt verse lucht uit de hogere luchtlagen langs de helling van de vulkaan naar beneden.



Figuur 6 Metingen aan de atmosfeer vinden in de nacht plaats omdat dan lucht uit de hogere luchtlagen naar beneden stroomt.

In figuur 7 zijn de CO_2 metingen te zien van april 2014 tot april 2015. De hoeveelheid CO_2 wordt gemeten in ppm (parts per million). Het gaat hier om volumedelen. In april 2016 bevatte elke m^3 lucht dus 0,4 liter CO_2.



Figuur 7 Seizoensinvloeden op de hoeveelheid atmosferisch CO_2. In mei zorgt de fotosynthese voor een afname en in oktober komt aan de fotosynthese een einde.

Opdracht 3 (►URL2)
Bekijk de video van URL2:

Opdracht 4
De hoeveelheid koolstof in atmosferisch CO_2 begin oktober 2017 wordt geschat op 760 Gton. In de winter is er geen fotosynthese maar wel ademhaling plus uitstoot. In de zomer is er sprake van fotosynthese en ademhaling plus uitstoot.

a. Bepaal de maandelijkse toename van de hoeveelheid CO_2 in de maanden november, december en januari.
b. Bepaal de maandelijkse afname in de zomer van de hoeveelheid CO_2 .
c. Bepaal de jaarlijkse toename van de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer.

Modellen gaan altijd uit van vereenvoudigende aannames. Maak nu de volgende aanvullende aannames:

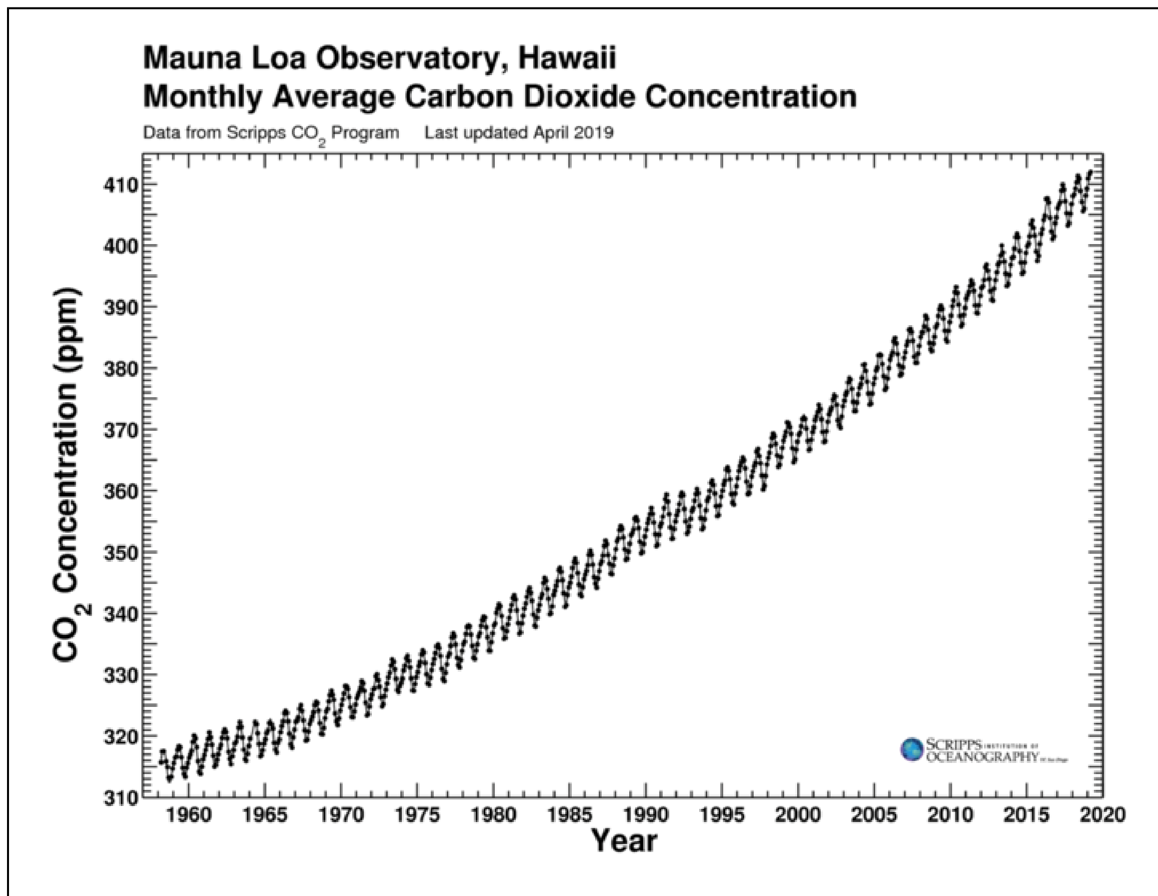
- In de zomer zijn ademhaling en uitstoot hetzelfde is als in de winter.
- De atmosferen van zuidelijk en noordelijk halfrond mengen niet.
- CO_2 lost niet op in de oceaan.

d. Bereken met behulp van a en b de maandelijkse opname van CO_2 door planten in de zomer.
e. Stel: in de maanden februari tot en met mei is de opname van CO_2 de helft van die in de zomer. Oktober idem. Bereken de jaarlijkse opname van CO_2 .

In werkelijkheid zijn de aannames niet geldig.

f. Bereken de antwoorden van a tot en met e onder de aanname dat 60% van het vrijkomende CO_2 oplost in het oceaanwater.
g. Hoe veranderen de antwoorden als de ademhaling in de winter lager is dan in de zomer?
h. Hoe veranderen de antwoorden als de atmosferen van Noord en Zuid wel voor een gedeelte mengen?

Het Mauna Loa Observatorium is het meest gezaghebbende instituut ter wereld vanwege de lange ononderbroken reeks metingen van het CO_2-gehalte van de atmosfeer. De meetreeks vanaf 1958 tot 2018 is weergegeven in figuur 8. De grafiek staat bekend als de Keeling-curve ter nagedachtenis aan de man met wie alles begonnen is, maar die in 2005 is overleden. Zoon Ralph Keeling heeft het werk van zijn vader overgenomen.



Figuur 8 De Keeling-curve

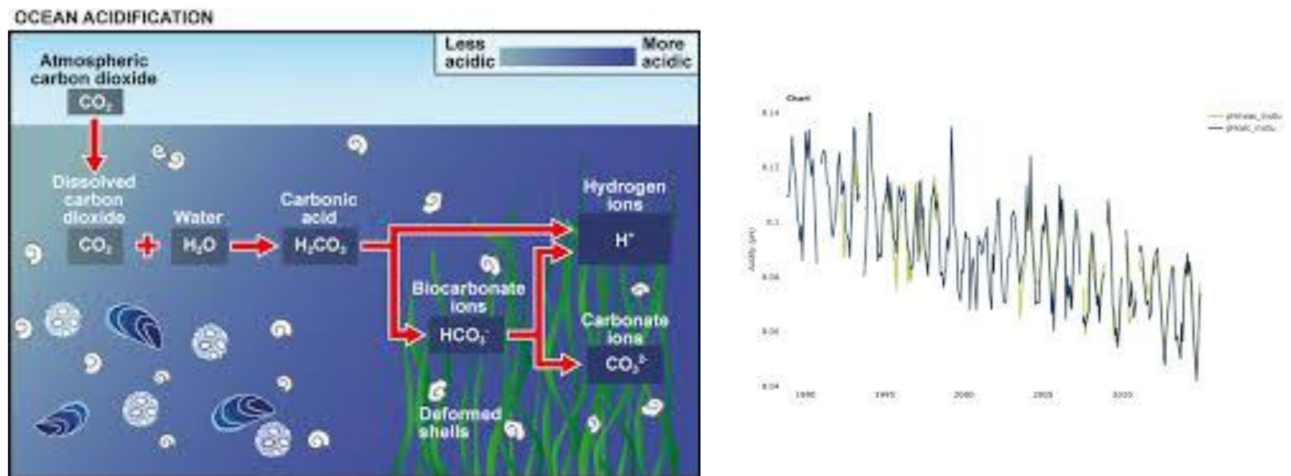
Opdracht 5 (►URL3)

Hoe kun je nagaan of de groeifactor k van de curve van figuur 8 verandert?
Het is handig om de grafiek van figuur 8 zelf even te downloaden vanaf het internet. Het adres is achterin deze syllabus te vinden (URL3).
Je hebt dan meteen de meest recente versie van de grafiek. In *mspaint* kun je vervolgens raaklijnen trekken.

a. Trek bij 1960 een raaklijn aan de Keelingcurve. Kies de onderkant.
b. Bepaal de jaarlijkse toename van het CO_2 gehalte in ppm/jaar.
c. Bepaal de jaarlijkse procentuele toename in oktober 1960.
d. Bepaal ook de jaarlijkse procentuele toename in 2018.
e. Conclusie?

Verzuring van de oceanen

Bij de gevolgen van de toename van CO_2 denkt iedereen meteen aan opwarming van de aarde. Maar het eerste directe gevolg is dat CO_2 wordt opgenomen door het zeewater. Dat heeft verzuring van het zeewater tot gevolg. De gevolgen zijn het sterkst zichtbaar bij koraalriffen

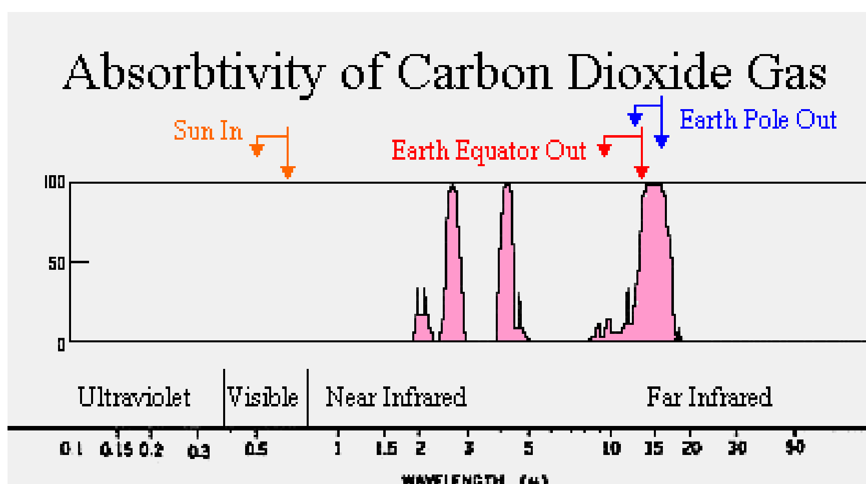


Figuur 9 Oplossing van CO_2 in zeewater leidt tot verzuring van de oceanen. De gemiddelde pH van het zeewater is aan het dalen. Dit bemoeilijkt de kalkschaalvorming.

De koraalriffen lijden grote schade door de verzuring. De diversiteit neemt af en bij een pH kleiner dan 7,7 dreigt de koraalgroei geheel tot stilstand te komen.

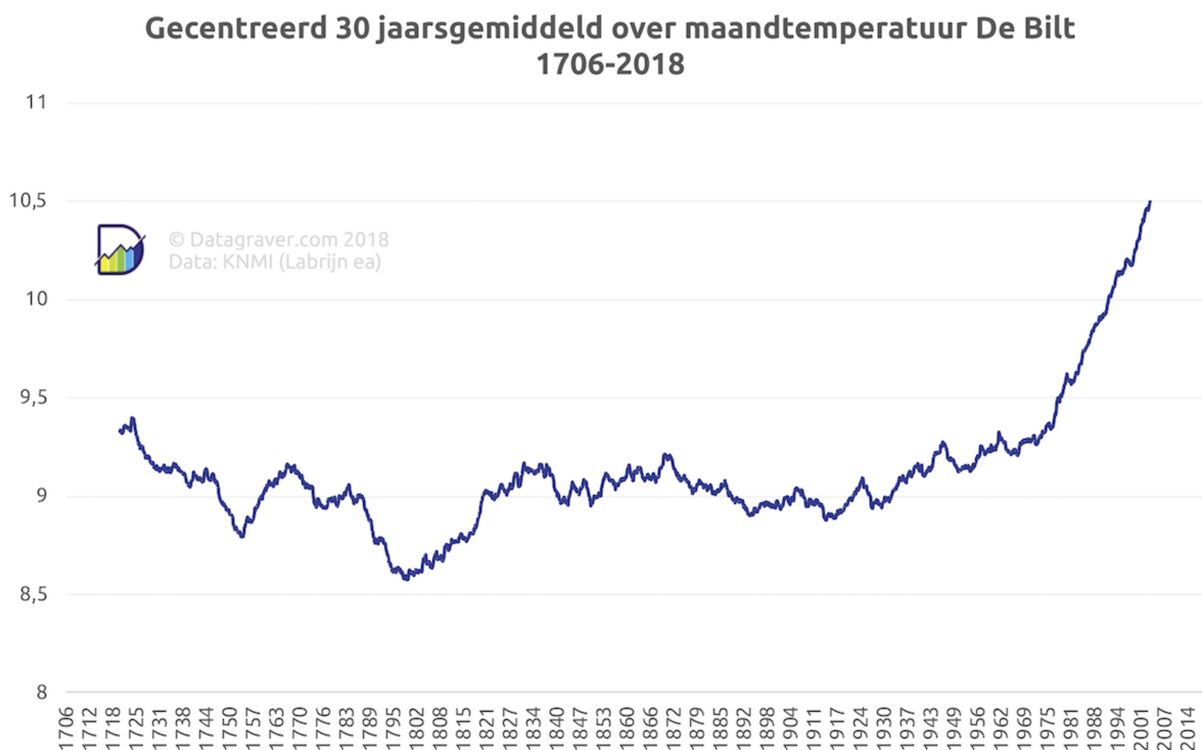
Opwarming

Vast staat dat de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer versneld toeneemt. Vast staat ook dat CO_2 een broeikasgas is. Het molecuul absorbeert warmtestraling die van de aarde afkomt. Veel minder duidelijk is het verband tussen temperatuurstijging en CO_2-toename. In figuur 10 is de stralingsabsorptie weergegeven van CO_2 zoals gemeten m.b.v. satellietwaarnemingen.

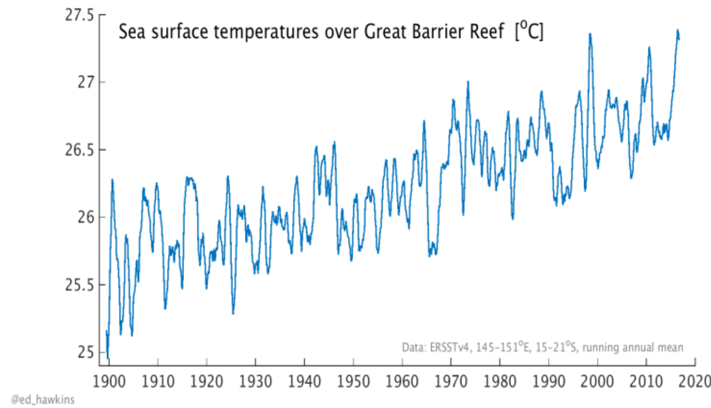


Figuur 10 Stralingsabsorptie van CO_2. De totale warmteabsorptie is evenredig met het oppervlak onder de grafiek. In een groot gedeelte van het spectrum is de absorptie al 100%. De intervalletjes geven de relevante spectrale gebieden van het betrokken gebied van temperatuurstraling aan. Zonnestraling wordt dus niet onderschept door CO_2. Het kleine pijltje geeft het stralingsmaximum aan en het grote pijltje het midden van het stralingsspectrum.

Het is moeilijk te zeggen hoe de absorptiegrafiek verandert bij toenemend CO_2-gehalte. Bij 15 µm is de absorptie blijkbaar al maximaal dus de sterkste effecten zouden moeten komen van straling bij 2, 5 en 10 µm. Aardoppervlak met een temperatuur van 18°C heeft een stralingsmaximum bij 10 µm. Die straling is volop aanwezig en wordt niet geabsorbeerd door waterdamp. Goede kans dat die dus wordt geabsorbeerd door CO_2!
Het belangrijkste probleem bij het voorspellen van het temperatuureffect als gevolg van de CO_2-toename is het complexe karakter van de atmosfeer. Temperatuurstijging kent zowel negatieve als positieve terugkoppelingseffecten.
Om een voorbeeld te geven van zo'n negatief terugkoppelingseffect: als het warmer wordt verdampt er meer water. Dat leidt tot meer wolken. Daardoor kaatst zonlicht meer terug. Einde opwarming.
Maar er zijn ook positieve terugkoppelingen: door de toename van de temperatuur zou methaangas, nu nog gevangen in de permafrost, kunnen vrijkomen. Voor methaan geldt dat het moment van verzadiging nog lang niet is bereikt...
Al met al kan niemand met zekerheid zeggen hoe CO_2-toename tot temperatuurstijging leidt. Maar dat de temperatuur op dit moment aan het stijgen is, kan toch niet ontkend worden.
Figuur 11 laat het temperatuurverloop zien in de Bilt in de afgelopen 300 jaar. Er is gebruik gemaakt van 30-maandelijkse voortschrijdende gemiddelden om alle schommelingen onzichtbaar te maken en de trend te onthullen. En een grafiek is opgenomen van de temperatuur van het zeewater bij het Great Barrier Reef (figuur 12).



Figuur 11 Drie eeuwen temperatuurverloop in de Bilt.



Figuur 12 Temperatuurverloop van het oceaanwater bij het Great Barrier Reef.

Het verband tussen CO_2-toename en temperatuurstijging is al lastig. Maar voorspellen wat temperatuurstijging voor gevolgen geeft is helemaal lastig. Zeespiegelstijging wordt genoemd. Voor een land als Nederland is dat natuurlijk belangrijker dan voor Oostenrijk om een voorbeeld te noemen.

De gevolgen voor ecosystemen zijn enorm. De temperatuurstijging van het water rond het Great Barrier Rif heeft inmiddels geleid tot verbleking van een derde van het rif. De algen die in symbiose met het koraal leven en die het rif zijn kleuren verschaft kunnen slecht tegen de temperatuurstijging.

Het Amerikaanse instituut NOAA (*National Oceanic and Athmosperic Administration*) waaronder ook het Mauna Loa Observatorium valt heeft een permanent systeem van monitoring van de duizenden koraalriffen in de wereld ingesteld. De toestand is alarmerend. De vraag rijst wat kunnen we er aan doen. Antwoord: veel!

Hoofdstuk 2: De CO_2-transitie

Terugdringen van de CO_2-uitstoot wordt de belangrijkste uitdaging voor de 21^{e} eeuw.
In dit hoofdstuk:

- leer je hoe je je eigen energiegebruik kunt berekenen;
- leer je hoe je je eigen CO_2-uitstoot kunt berekenen;
- leer je op welke drie manieren de mondiale uitstoot van CO_2 kan worden tegengegaan;
- bestudeer je de mogelijkheden van opslag van energie;
- leer je hoe je de energieproductie kunt meten van een Blue-Energy centrale;

2.1 Energiegebruik in Nederland

Hoeveel energie gebruiken we in Nederland? Hoeveel gebruikt een gemiddeld huishouden? En hoeveel procent daarvan is fossiel? Bestuderen van de jaarlijkse energierekening kan helpen. De tabel in figuur 13 geeft een overzicht van energie-inhoud en CO_2-emissiefactoren voor een aantal gangbare energiedragers.

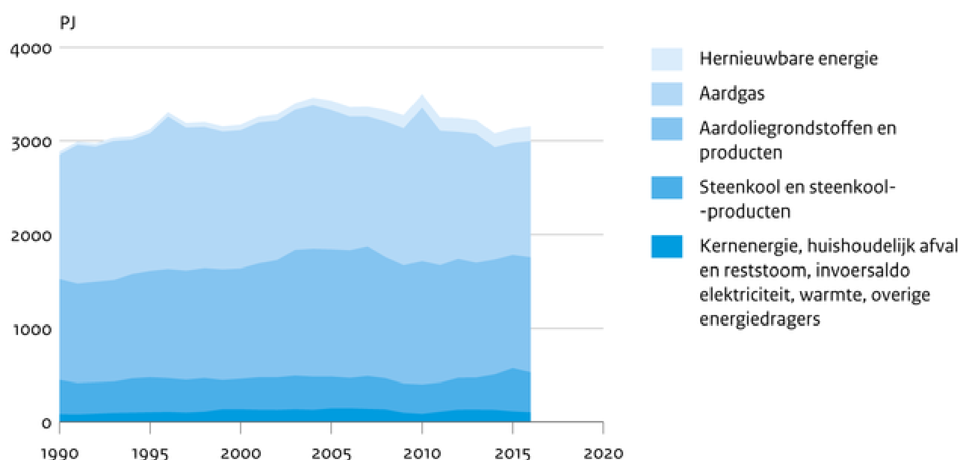
Energiedrager	Verkoopeenheid	Kosten per eenheid	Energiewaarde	Emissiefactor in gram CO_2 per MJ vanaf de bron	Toelichting bij emissiefactor
Elektriciteit uit fossiele bronnen	kWh	€ 0,25	3,6 MJ/kWh	180	Gangbare productie uit mix van fossiel/nucleair
Elektriciteit uit wind	kWh	……….	3,6 MJ/kWh	3	Inclusief bouw van de molen
Elektriciteit uit zonnestroom	kWh	……….	3,6 MJ/kWh	19	Inclusief bouw van de panelen
Gas	M^3	€ 0,60	32 MJ/m^3	59	Van bron tot gebruik
Benzine	Liter	€ 1,60	32 MJ/liter	90	Van bron tot gebruik
Diesel	Liter	€ 1,30	40 MJ/liter	81	Van bron tot gebruik

Figuur 13 Gegevens over enkele energiedragers

Opdracht 6 Energiegebruik
Gebruik voor deze vraag de tabel in figuur 13.
Een huishouden van drie personen gebruikt gemiddeld per dag 10 kWh aan elektrische energie. De jaarlijkse gasrekening meldt een verbruik van 1600 m^3 gas. Het gas wordt verbruikt voor de productie van warmte voor CV, sanitair en de keuken. Verder heeft het gezin de beschikking over een auto die 1 op 20 rijdt, benzine gebruikt en waarmee jaarlijks 19 duizend km wordt gereden.

a. Bereken het directe energiegebruik per persoon van dit gezin in GJ per jaar.
b. Bereken het procentuele aandeel van de drie posten: elektriciteit, warmte en transport.
c. Bereken het directe energiegebruik van de Nederlandse huishoudens. Neem aan dat er 17 miljoen Nederlanders zijn met hetzelfde energiegebruik als de leden van dit gezin

Het netto directe energiegebruik van Nederlanders geeft geen goed beeld van het daadwerkelijk gebruik van energie. Om bijvoorbeeld elektriciteit te produceren is energie nodig. Hetzelfde geldt voor benzine. En aardgas is wel een primaire energiedrager maar moet gewonnen en getransporteerd worden. Ook daar is energie voor nodig. Voor het door de consument gebruikt kan worden is er al veel energie gebruikt. Beter is het dus te kijken naar het bruto directe energiegebruik.
Neem als voorbeeld de auto: in plaats van *tank to wheel* zou je moeten kijken naar *well to wheel.* Maar belangrijker is nog het indirecte energiegebruik. De spullen die we kopen en de diensten waarvan we gebruik maken kosten ook energie. Bijgaande grafiek van het CBS geeft inzicht in het totale energiegebruik per Nederlander.



Figuur 14 Nederlanders gebruiken rond de 3000 PJ = 3 EJ = 3 * 10^{18} J per jaar. Het grootste deel daarvan heeft betrekking op fossiele brandstoffen.

2.2 Energiegebruik en CO_2-uitstoot.

In hoofdstuk 2 is naar voren gekomen dat de CO_2-uitstoot klimaatproblemen veroorzaakt. Dat probleem wordt veroorzaakt door de verbranding van fossiele grondstoffen. Energiegebruik is dus problematisch voor zover sprake is van het gebruik van fossiele brandstoffen. In opgave 7 bereken je de CO_2-uitstoot als gevolg van direct energiegebruik.

Opdracht 7 CO_2-uitstoot

Het gezin van drie personen uit de vorige vraag had een direct energiegebruik dat er als volgt uitzag:

Elektriciteit	13 GJ
Aardgas	51 GJ
Benzine	30 GJ

a. Bereken de CO_2-uitstoot van het gezin uit de vorige vraag ervan uitgaande dat de elektriciteit geheel wordt opgewekt met fossiele brandstoffen.

Het gezin is erg geschrokken van de ernst van de CO_2-problematiek. Zij besluiten zonnepanelen te nemen die per jaar 2000kWh opleveren en in plaats van de auto voortaan alleen de fiets te nemen.

b. Bereken de vermeden CO_2-uitstoot van het gezin als gevolg van deze aanpassingen.

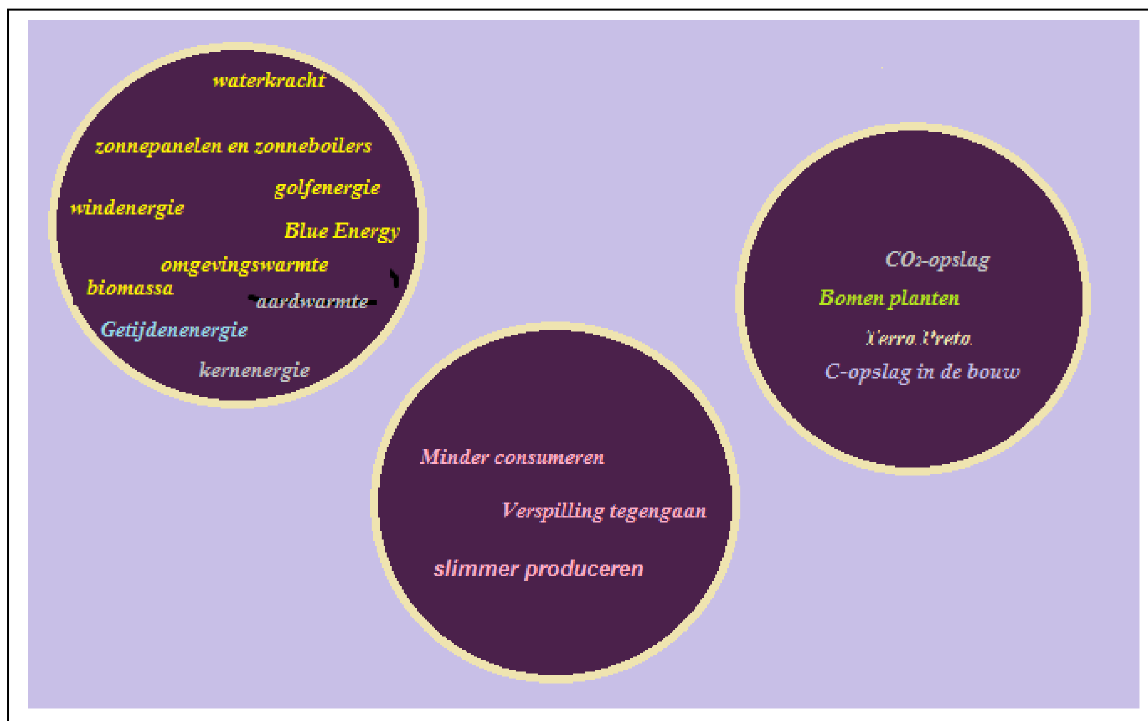
Nederland gebruikte in 2017 een hoeveelheid energie van 3,15 ExaJoule (EJ) =$3{,}15*10^{18}$ J. Met 17,5 mln. Nederlanders komt dat neer op 185 GJ per persoon met een bijbehorende CO_2-uitstoot van 10 ton. In de klimaatwet is vastgelegd dat in 2030 de CO_2-uitstoot met 49% en in 2050 met 95% moet zijn gereduceerd. Hoe kan dat worden gerealiseerd zonder de economische activiteit met 95% te reduceren?

2.3 Oplossingen voor het CO_2-probleem

Alle denkbare maatregelen zijn onder te brengen in drie gebieden. In figuur 15 zijn deze weergegeven. De drie manieren om de uitstoot van CO_2 te verminderen zijn:

Aanboren niet-fossiele energiebronnen

Zonnepanelen, zonneboilers, windenergie, waterkracht, biomassa zijn de meest genoemde vormen van hernieuwbare energie. Dit zijn allemaal vormen van zonne-energie. Ook omgevingswarmte is daar een voorbeeld van.
Zelfs in de winter kunnen we aan de omgeving warmte onttrekken om het in huis nog warmer te maken. Daarvoor is dan wel een warmtepomp nodig.



Figuur 15 Drie manieren om CO_2-uitstoot te verminderen: Niet-fossiele energiebronnen ontsluiten, minder en slimmer consumeren, koolstof-opslag.

Blue Energy, het onttrekken van energie aan zoet en zout water, is ook een vorm van zonne-energie want de scheiding van zoet en zout water vindt plaats door de zon middels verdamping. Aardwarmte en kernenergie stammen uit de tijd dat de aarde gevormd werd. Getijdenenergie danken we aan de maan.

Minder en slimmer consumeren en produceren

De uitstoot van CO_2 kan ook verminderd worden door af te zien van consumptiebehoeften met een hoge CO_2-emissiefactor. Een CO_2-heffing per product zou voor de hand liggen. De vervuiler betaalt. Met een heffing van 40 Euro per ton zou een intercontinentale vliegreis (emissie 100 kg CO_2 per uur vliegen per persoon) voor elk uur vliegen dus 4 Euro duurder worden.
Beperking van CO_2-uitstoot kan ook worden gerealiseerd door slimmer te produceren en te consumeren. In zijn boek "*Absurde overvloed"* schetst de scheikundige Michael Foley de merkwaardige kenmerken van een consumptiemaatschappij. Met name de foto op de omslag trekt al de aandacht. Latere generaties zullen zich verbazen over het gedrag van hun voorouders. In autoreclames wordt altijd gezinspeeld op de enorme bewegingsvrijheid die de auto verschaft. De foto maakt duidelijk dat er weinig situaties zijn waar die bewegingsvrijheid kleiner is.



Figuur 16 De illusie van het autorijden

De zelfrijdende auto is wellicht nog ver weg maar hier zou het toch al een grote vooruitgang zijn als auto's op de snelweg bij grote drukte elektronisch zouden kunnen worden gekoppeld. De CO_2-uitstoot zou daarmee aanzienlijk kunnen worden verminderd! Opgave 8 gaat over de CO_2-uitstoot in dit soort situaties.

Opdracht 8
Bekijk de foto van de omslag van het boek van Michael Foley.
a. Maak een schatting van het aantal auto's op 1 km van deze weg. Maak daartoe eerst een schatting van de lengte van een auto en de afstand tussen twee auto's op deze weg.
b. In een file rijden auto's met een snelheid van 20 km/uur en bedraagt het gemiddeld brandstofgebruik 6 liter per uur. Maak een schatting van de gemiddelde uitstoot per uur voor 1 km weg. Gebruik hierbij de tabel uit figuur 13.
c. Leg uit hoe elektronische koppeling van deze auto's een bijdrage kan leveren aan de vermindering van CO_2-uitstoot.

Koolstofopslag

Tenslotte is er de mogelijkheid om koolstof op te slaan in de bodem.
In de natuur gebeurt dat nu al. In gebieden waar de bodem met rust wordt gelaten zoals bossen, bijvoorbeeld, is de bodem bedekt met een humuslaag.
Deze laag bevat zeer veel koolstof. Schattingen van de hoeveelheid koolstof die in de bodem ligt opgeslagen komen neer op 1,6 TeraTon (1 Tera = 10^{12}) terwijl de voorraad atmosferisch CO_2 ongeveer 0,8 TeraTon aan koolstof bevat.
Wordt de humuslaag dikker dan neemt de hoeveelheid opgeslagen koolstof natuurlijk toe. Helaas is wereldwijd het omgekeerde proces aan de gang. Bodemdegradatie is verantwoordelijk voor 25% van de totale CO_2-toename in de atmosfeer. Bodemherstel zou internationale prioriteit moeten hebben.
CO_2-opslag CO_2 kan ook rechtstreeks kunnen worden opgeslagen. Dit gebeurt nu al in lege gasvelden op de Noordzee. Het gas wordt onder hoge druk geïnjecteerd. Het is een kostbare en niet ongevaarlijke procedure. Een bekend voorbeeld is het Sleipner-veld in de Noordzee waar CO_2 wordt opgeslagen in een rotsformatie 800 meter onder de zeebodem. Maar inmiddels zijn scheuren ontdekt waarlangs het CO_2 zou kunnen ontsnappen. Als dat gebeurt is de opslag voor niets geweest maar bovendien dreigt in dat geval verzuring van het zeewater.
Boomaanplant. Een alternatief is het planten van bomen. Een boom slaat veel koolstof op met name als de boom nog groeit. Maar alleen de aanplant is natuurlijk niet voldoende. Zaailingen komen overal wel op. Belangrijker is het bijbehorend beheer. In een bos dat bedoeld is om zoveel mogelijk CO_2 op te slaan moet de boom op tijd gekapt worden. Dit is het geval als de afnemende CO_2-opslag in de stam minder wordt dan de toenemende CO_2-opslag in jongere concurrerende bomen. Vervolgens is er wellicht een bestemming voor het hout als timmerhout. Ook dat betekent effectief dat het hout nog enkele decennia als opslagmedium functioneert. Maar uiteindelijk komt toch het eindpunt in zicht. Verbranding is

een optie en wordt ook vaak toegepast. Gebruik van biomassa voor energie leidt ook tot vermijding van gebruik van fossiele brandstoffen. Maar er is een alternatief!
Houtskool. In plaats van verbranding is er ook de mogelijkheid van pyrolyse. Het hout wordt verhit zonder dat er zuurstof bij komt. Er ontstaat dan houtskool. Houtskool is veel beter bestand tegen de tand des tijds. Houtskoolresten uit de prehistorie zijn voor archeologen niet onbekend. Dat betekent dus dat koolstof voor duizenden jaren kan worden opgeslagen Houtskool heeft bovendien de bijzondere eigenschap dat het zorgt voor verbetering van de bodem. In het Amazonegebied komen donkergekleurde bodems voor die in het Portugees ***Terra Preta*** worden genoemd. Precolumbiaanse beschavingen hebben hier eeuwenlang hun akkers verrijkt met houtskoolresten, beenderen en ander organisch afval. De grond blijkt erg vruchtbaar te zijn. Bodemonderzoek vindt plaats aan Wageningen Universiteit om te achterhalen hoe dit mogelijk is. Opslag van houtskool in de bodem betekent in ieder geval dat CO_2 voor zeer lange tijd aan de atmosfeer onttrokken wordt.
Koolstof-opslag in de bouw. Bouwen met hout wordt steeds populairder. Er worden zelfs al flats van hout gebouwd. Dergelijke gebouwen staan al snel een eeuw en dat is dus een vorm van opslag. Bovendien kan daarna bij verstandige sloop het hout alsnog een nieuwe bestemming krijgen. En er zijn nog andere ontwikkelingen. Door aan hout lignine te onttrekken kan het geschikt gemaakt worden voor nieuwe duurzame bouwmaterialen die op grote schaal kunnen worden ingezet. Ook hierdoor zou koolstof worden opgeslagen.

Opdracht 9
De Nederlandse uitstoot bedraagt volgens het PlanBureau voor de Leefomgeving 187 Mton CO_2 equivalent. (Uitstoot van methaan en lachgas zijn dan meegerekend.) (PBL: Balans voor de leefomgeving (2018)).

a. Bereken hoeveel ton koolstof (C) in de vorm van houtskool moet worden opgeslagen om die uitstoot geheel te compenseren?
b. Hoeveel ruimte zou een dergelijke hoeveelheid koolstof innemen? (dichtheid houtskool = 400 kg/m^3)

Voor 1 m^3 houtskool (400 kg) is 4 m^3 hout nodig. Een goed beheerd populierenbos levert het hout van 20 jaar oude populieren. Een populier van 20 jaar oud, 28 m hoog en 37 cm dik levert bij benadering 2,8 m^3 hout.

c. Bereken hoeveel CO_2 gecompenseerd wordt door een populier in houtskool om te zetten en die houtskool op te slaan?

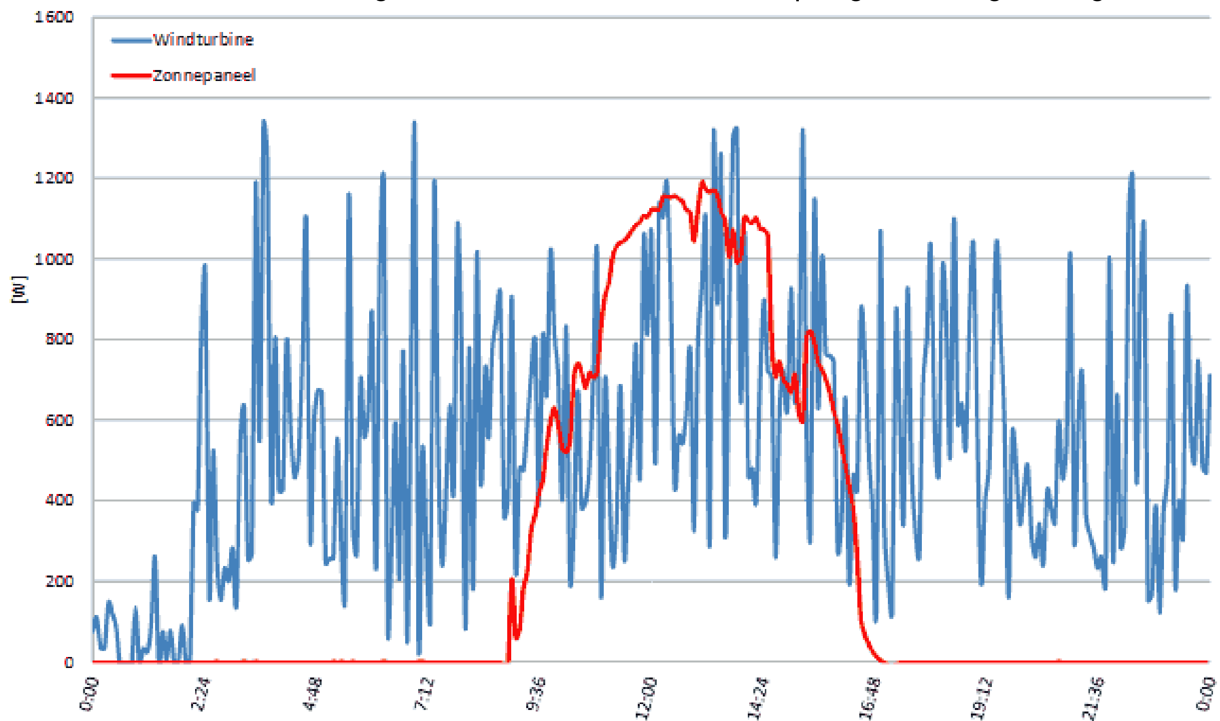
In een goed beheerd populierenbos is de bijgroei ongeveer 15 m^3 hout per ha per jaar.

d. Bereken hoeveel CO_2 een populierenbos van 1 km^2 in principe per jaar kan compenseren met het hout dat er vanaf komt (al dan niet eerst in gebruik als timmerhout).

2.4 Zon en wind en het probleem van energieopslag

De belangrijkste hernieuwbare energiebronnen voor de productie van elektriciteit zijn zon en wind. Maar elektrische energie van zon en wind zijn erg variabel. En het energie-aanbod sluit helemaal niet aan op de vraag. Om enig idee te krijgen van de problemen van wind en zon is in figuur 17 een grafiek weergegeven van de elektriciteitsproductie van een kleine windmolen en een PV-systeem (PV=photoVoltaic).

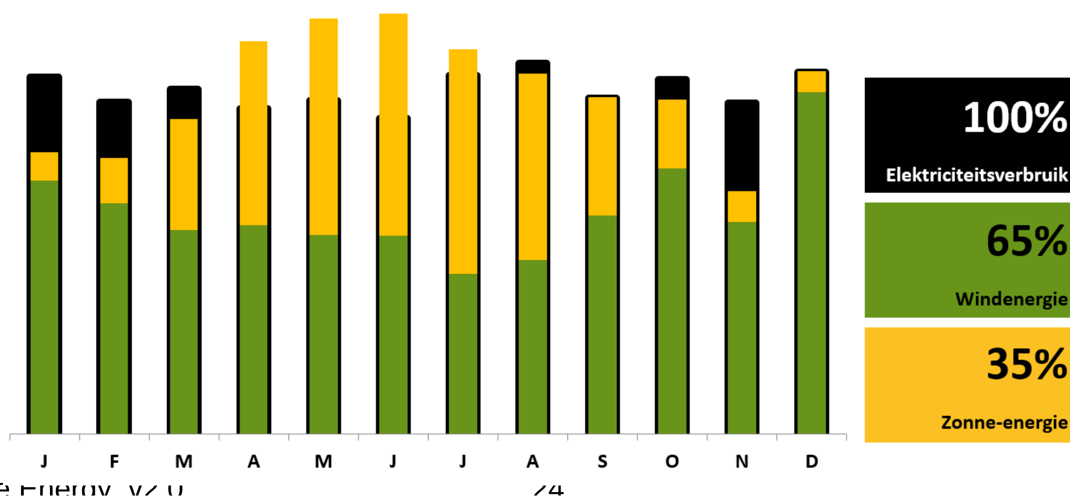
Het is onmiddellijk duidelijk waar het probleem ligt. Je kunt de stofzuiger echt niet rechtstreeks op de windmolen aansluiten. En na 24.00 uur doet de TV niets en werkt niets meer als het windstil is. De zon levert alleen overdag. De wind gaat nooit onder maar het aanbod kan erg grillig zijn. In principe is de netbeheerder verantwoordelijk voor aanpassing van het aanbod aan de vraag naar elektriciteit. Daarvoor is opslag van energie nodig.



Figuur 17 Vermogen van een kleine windmolen en een klein systeem met zonnepanelen in de loop van een zonnige dag in het voorjaar. Bron: Generator.be/MarcDoigne

Allerlei systemen zijn daarvoor beschikbaar. Er zijn systemen die speciaal geschikt zijn voor de hele snelle veranderingen (vanaf een fractie van een seconde tot minuten), er zijn systemen die energie opslaan voor een duur van uren tot dagen en er zijn systemen die geschikt zijn voor seizoenopslag. Synthetische brandstoffen, geproduceerd met behulp van zon en wind, kunnen jaren worden opgeslagen en kunnen gebruikt worden voor andere doelen dan de elektriciteitsvoorziening.

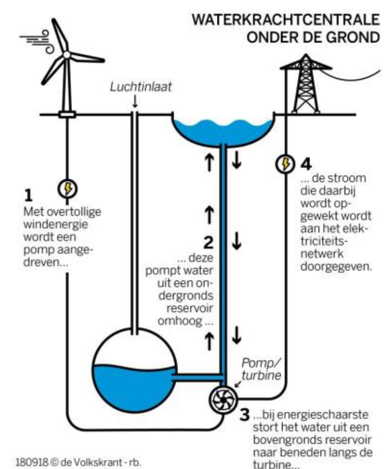
Seizoenopslag is nodig omdat zon en wind seizoenafhankelijk zijn. In figuur 18 is te zien dat zon en wind enigszins complementair zijn maar dat er periodes overblijven met een overschot in de zomer en periodes die door de Duitsers worden omschreven als "*Dunkelflaute".* Dit is een samentrekking van de woorden *dunkelheit* en *windflaute. Het waait dan te weinig om het gebrek aan zonnestraling te compenseren.*



Figuur 18 Zonnepanelen leveren vooral in de zomer. Wind zorgt voor enig compensatie. Maar in het late najaar en de winter kunnen zich situaties voordoen van Dunkelflaute (Dunkelheit und Windflaute). Bron: wattisduurzaam.nl/ThijsvandenBrink.

PSH (Pumped-Storage Hydroelectricity)

Meer dan 90% van alle energieopslag vindt plaats middels zwaarte-energie. In bergachtige gebieden is het mogelijk om water naar een hoger gelegen reservoir te pompen. Als er dan behoefte is aan energie kan vervolgens een turbine worden aangedreven door het water terug te laten stromen. Opslag in de vorm van gravitatie-energie is ook in Nederland mogelijk zoals aangetoond door Jan Huynen die op 86-jarige leeftijd promoveerde op energieopslag met behulp van een ondergronds waterreservoir op 1400 m diepte. Pompen, elektrisch aangedreven met behulp van overtollige windenergie, stuwen het water omhoog. In tijden van windstilte keert het water terug waarbij de pompen nu functioneren als turbines die elektriciteit leveren.



Figuur 19 PSH (Pumped-Storage Hydroelectricity)

Om één m^3 water 1 m omhoog te brengen is een hoeveelheid energie nodig van 10 kJ. Op een hoogte van 1400 m is de energie-inhoud van die m^3 dus 14 MJ ofwel 4 kWh. Hoeveel water moeten die pompen per seconde wegduwen? Als de windmolen een vermogen levert van 3,0 MJ per s moet de pomp dat wel kunnen verwerken. Om 1 m^3 water van het ondergrondse reservoir in het bovengrondse reservoir te persen is 14 MJ nodig. Dus de pomp moet dan 3/14 = 0,2 m^3 water per seconde kunnen verwerken. De waterspiegel bovengronds zal afhankelijk van het oppervlak van het bovengrondse meer maar een beetje stijgen. Bij gebruik daalt de stand weer.

Duidelijk is dat de energieopslag van Jan Huynen alleen zin heeft bij toepassing op grote schaal. In zijn proefschrift heeft Jan Huynen aangetoond dat zijn systeem 8,4 miljoen kWh zou kunnen opslaan. Daarmee zou bijna één miljoen huishoudens van stroom kunnen worden voorzien.

PSH (Pumped-Storage Hydro-electricity) is een centraal beheerd opslagsysteem. Die miljoen huishoudens krijgen hun energie van de netbeheerder.

Opdracht 10

Het systeem van energieopslag van Jan Huynen zou ook kunnen worden toegepast op zee. Als je googelt op *stensea* zie je daarvan voorbeelden.

a. Ontwerp een systeem waarmee de energie van een nacht van een grote windmolen op zee kan worden opgeslagen.
b. Maak een schatting van de minimale afmetingen van de opslagruimte.

Elektrochemische opslag

Maar opslag van energie kan ook decentraal. Dat kan met accu's. En dan denk je al snel aan een autoaccu.

Een traditionele auto-accu (12 V) weegt zo'n 14 kg en heeft een inhoud van 8 liter. Deze accu's hebben als eigenschap dat ze een groot vermogen kunnen leveren: 25 KW. Daarentegen bevatten ze niet erg veel energie als ze volgeladen zijn: 0,5 kWh. Dit komt



Figuur 20 Een auto-accu

omdat ze alleen maar bij het starten echt moeten leveren en dat duurt natuurlijk niet zo lang. Een huishouden zou dus minstens 20 van deze accu's moeten hebben om de energie van een dag (10 kWh) te kunnen opslaan. Aangezien accu's te lijden hebben van zelfontlading die kan oplopen tot 10% per maand zijn accu's helaas niet geschikt voor seizoenopslag.
Bij energieopslagsystemen is het gebruik te kijken naar de **energiedichtheid**. Dat is de energie die in 1 m^3 kan worden opgeslagen.
De energiedichtheid van deze autoaccu = 0,5 kWh/8 liter = 0,063 kWh/liter = 63 kWh/m^3.
Behalve de energiedichtheid is ook de **vermogensdichtheid** van belang. Met welke snelheid kan de accu worden gevuld? Het bovengenoemde PV-systeem kan wel 2,5 kW leveren op een dag in de zomer. Kan de accu dat aan?
Voor loodaccu's geldt dat ze een vermogensdichtheid hebben van 180 kW/m^3. Een accu zoals boven met zijn volume van 8 liter kan dan 22 kW vermogen leveren/opnemen. Het systeem met twintig accu's kan het energie-aanbod dus moeiteloos verwerken.
Een derde belangrijke parameter van een opslagsysteem is de **round-trip-efficiency** (RTE) Elektrische energie wordt bij een accu omgezet in chemische energie bij het opladen en bij het ontladen gebeurt het omgekeerde. Daarbij gaat altijd wel energie verloren. Voor de loodaccu is de RTE = 85%. Niet slecht dus.
De voorraad lood in de wereld is groot genoeg maar een massale productie van loodaccu's is toch niet wenselijk. Als de accu niet gerecycled wordt, is er kans op ernstige milieuschade door onder meer het lood. Het zeer sterke zuur in de accu is bij contact bovendien erg gevaarlijk.
Grootschalige inzet van alternatieve energiebronnen vereisen een brede inzet van opslagtechnologieën. Gelukkig zijn er daar zeer veel van. Behalve opslag in de vorm van chemische energie (batterijen-accu's-waterstofgas-methaangas-synthetische kerosine) kan energie ook worden opgeslagen in de vorm van mechanische energie en van elektrische en magnetische energie. Zie figuur 21.

Systeem	Technologie	Energie-dichtheid (kWh/m^3)	Vermogensdichtheid (kW/m^3)	Round-trip efficiency	Zelf-ontlading % per dag
Chemische opslag	Loodaccu	75	180	85%	0,2 %
	Li-ion (Powerwall Tesla)	270	1500	95%	0,2 %
	Flow-redox	75	0,2 - 2	75 %	0-10 %
	Waterstofgas (cilinder 200 bar)	600	0,2 - 20	46%	1 %
Mechanische opslag	Gravitatie-opslag PSH 100m	0,1	0,2 - 2,0	80%	0
	Kinetische opslag vliegwiel	20 - 80	5000	95%	20 - 100 %
	Compressie-opslag CAES	12	0,2 – 0,6	50 %	0
Elektro-magnetische opslag	Supercondensatoren	10 - 20	>40000	93 %	2 - 40 %
	SMES Magnetisme met supergeleiding	6	2600	95%	10 - 15 %

Figuur 21

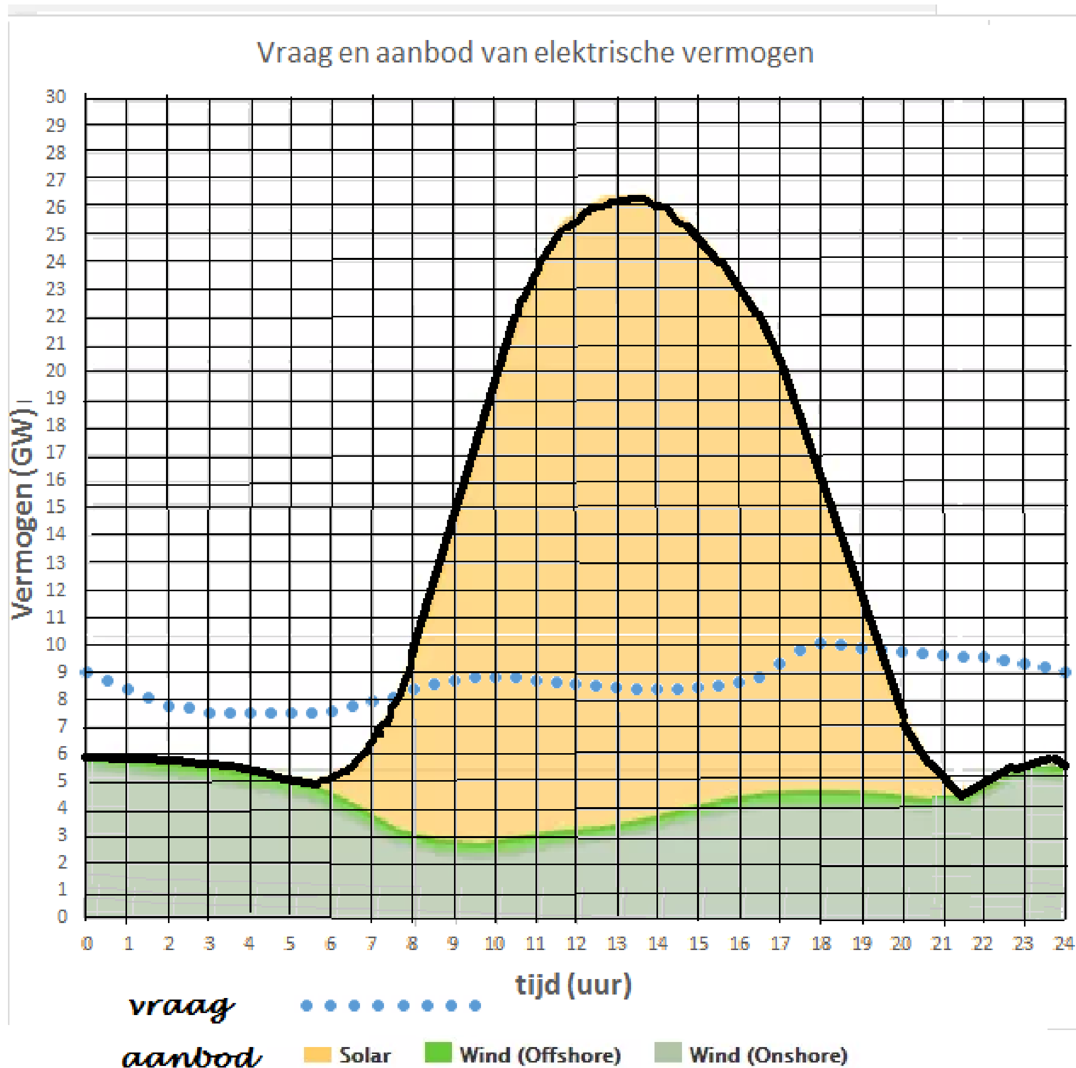
Opdracht 11

Bekijk de grafiek.. Het afgebeelde scenario laat het dag beeld zien van een mooie dag in juni. Het weer houdt nog wel een tijdje aan. De overtollige energie moet worden opgeslagen in accu's. Op t=0 zit er 100 GWH opgeslagen in accu's.

a. Bepaal met je grafiek hoeveel GWh er in het opslagreservoir zit om 8.00 uur in de ochtend.
b. Bereken hoeveel m^3 Lithium-ion accu's nodig zijn voor de opslag van twee van dit soort dagen. Houdt geen rekening met rendementsverliezen.

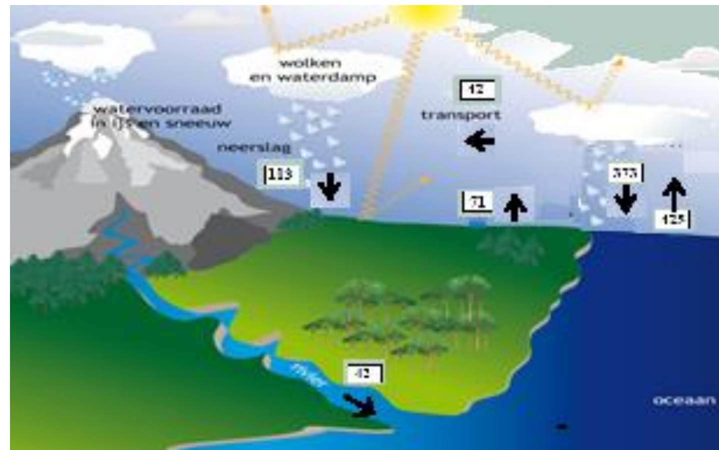
De opslag zou ook kunnen gebeuren door met de overtollige stroom water in waterstofgas en zuurstof om te zetten. Het waterstofgas wordt in opslagtanks van 10 m^3 onder een druk van 200 bar opgeslagen.

c. Bereken hoeveel van die tanks nodig zijn om de overtollige energie op te slaan van een week van dit soort dagen.



2.5 Blue Energy: een experiment.

Zonne-energie vangen kan dus door gebruik te maken van de ***hydrologische kringloop*** (zie figuur 8). Door de zonnewarmte verdampt het water aan het oppervlak van zeeën en oceanen. De waterdamp stijgt op en een deel condenseert tot wolken die met de wind meedrijven tot boven continenten. Wanneer de lucht boven land afkoelt (bijvoorbeeld door verder op te stijgen) zal een deel van het water als neerslag (regen of sneeuw) op de aarde vallen. Water komt dus vroeg of laat, afhankelijk van de plaats waar de neerslag is gevallen, weer in de zeeën en oceanen terug.

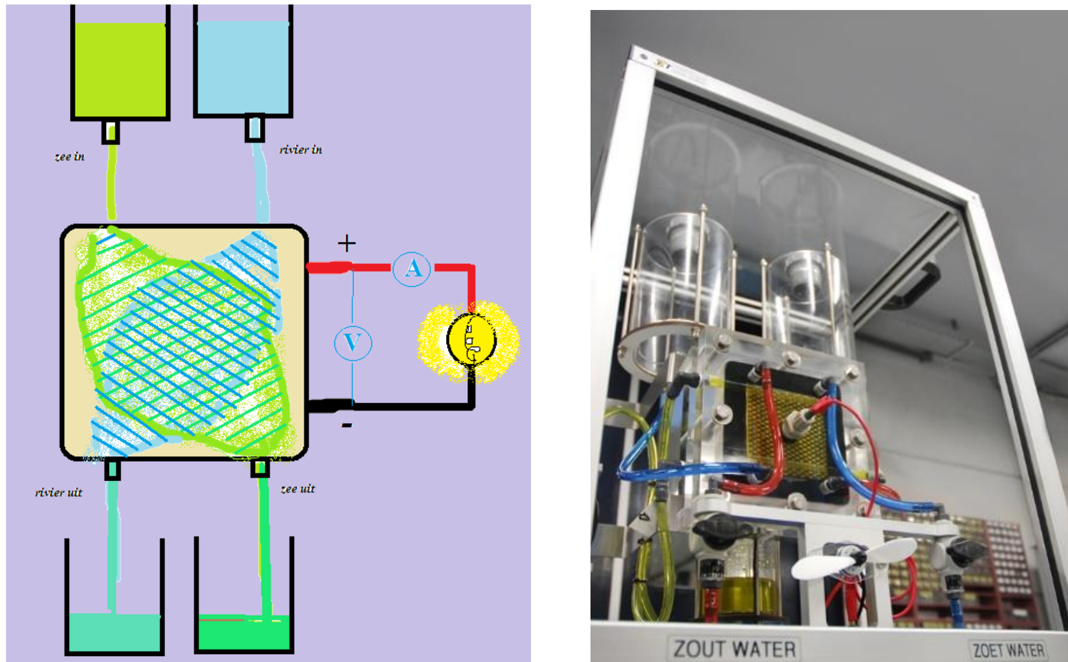


Figuur 22 de hydrologische kringloop. De getallen hebben betrekking op de fluxen in 1000 km^3 per jaar.

Tijdens dit proces wordt zonne-energie in drie andere vormen van energie omgezet.
Als 1 liter zeewater met een gemiddeld zoutgehalte van 30 gram per liter onder standaardomstandigheden wordt omgezet in waterdamp en zout en de waterdamp naar een hoogte wordt gebracht van 10 km dan is er voor de omzetting van de vloeistof naar de damp 2256 kJ nodig, voor de isolatie van het zout is 2,5 kJ nodig en er ontstaat 100 kJ gravitatie-energie. Vervolgens moet bedacht worden dat elke seconde 14 miljard liter zeewater met behulp van zonne-energie verdampt en het is duidelijk dat er heel wat zonne-energie wordt omgezet.
Die damp condenseert in de hogere luchtlagen en daarbij komt de energie die in de damp lag opgeslagen weer vrij in de vorm van warmte. Die energie blijft dus ongebruikt. Ook van de gravitatie-energie wordt slechts een klein deel gebruikt. De meeste druppels vallen terug in zee (90%) Maar ook de druppels die op land vallen verliezen de meeste zwaarte-energie in de lucht. Niettemin werken alle waterkrachtcentrales in de wereld op het resterende gedeelte. Zij produceren ***Hydro-elektriciteit.***
Maar de regendruppels die naar beneden vallen bevatten nog steeds geen zout. Pas als ze op de bodem vallen neemt het water mineralen op uit de bodem. Tegen de tijd dat de rivier uitstroomt in zee bevat het water per liter ongeveer 1 gram zout.
Als een liter rivierwater in zee stroomt komt er 2 kJ vrij door de zoutmenging. Per jaar stroomt er 40 duizend km^3 rivierwater in zee. Dus bij dat uitstromen komt totaal 80 EJ vrij.
Ter vergelijking: de totale elektriciteitsproductie in de wereld is 92 EJ.
Teruggewonnen zonne-energie van deze soort wordt ***Blue Energy*** genoemd.
Bekijk ook dit internetadres: **(►URL4)**

Kan Blue Energy een echte bijdrage leveren aan de elektriciteitsvoorziening?

In figuur 23 is een foto van een proefopstelling en een schematekening te zien. De werking wordt uitgelegd in hoofdstuk 4.

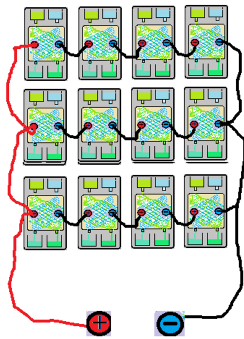


Figuur 23 Een proefinstallatie waarop een lampje is aangesloten (links) of een propeller (rechts)

Het lampje kan branden vanwege het concentratieverschil tussen zeewater en rivierwater. Om elektriciteit te kunnen leveren moet het rivierwater dus iets zouter worden en het zeewater iets minder zout.
Kan Blue Energy een echte bijdrage leveren aan de elektriciteitsvoorziening? Stel dat je die vraag kreeg voorgelegd en je hebt de beschikking over de proefcentrale uit figuur 23: hoe pak je dat dan aan? Je moet dus onderzoek gaan doen.
Opzetten van zo'n onderzoek verloopt in vier fasen:
In de **oriëntatiefase** probeer je de algemene vraag die voorligt te vertalen in een onderzoeksvraag. In de **voorbereidingsfase** ga je na wat de relevante variabelen zijn om de onderzoeksvraag op te delen in deelvragen en wat nodig is om die variabelen te kunnen meten. In de **uitvoeringsfase** wordt het experiment gedaan. In de **afsluitingsfase** worden de conclusies getrokken en wordt het experiment geëvalueerd.
Oriëntatie: Hoe vertaal je de algemene vraag hierboven in een goede onderzoeksvraag? Je hebt een installatie tot je beschikking maar daar kun je geen huishouden mee van elektriciteit voorzien. Wat is dan wel nodig om een huishouden van elektriciteit te voorzien?
Je hebt een spanning U. In Nederland is die spanning 230 Volt. Als er dan apparaten op de stopcontacten worden aangesloten gaat er een stroom I lopen. Het vermogen dat dan aan de woning wordt geleverd door de elektriciteitscentrale kan worden berekend. Er geldt namelijk de volgende formule die je wel kent van de natuurkundelessen.

$$P = U * I$$

In het voorgaande is wel duidelijk geworden wat een huishouden gemiddeld gebruikt. Dat is 10 kWh ofwel 36 MJ per dag. Per seconde is dat 417 J. Als er dus op een stopcontact 230 Volt staat, loopt er gemiddeld een stroom van 417/230 = 1,81 A.
Een ding is zeker. De installatie van figuur 23 kan geen 417 W leveren. Het apparaat zal geen 230 Volt opwekken en kan geen stroom van 1,81 A leveren. Maar hoe zit het met meerdere van die installaties? Als je die apparaten in serie zet krijg je meer spanning. Helaas laat geen van de componenten 25 A door. Maar grotere stromen kun je verdelen over meerdere parallelketens. Zie figuur 24.



Figuur 24 Deze combinatieschakeling levert 4x zoveel spanning op en 3x zoveel elektrische stroom als één component. Alle componenten leveren dezelfde energie en vragen dezelfde hoeveelheid zeewater en rivierwater.

We kiezen het aantal productie-eenheden zodanig dat ze samen constant 417 Watt leveren terwijl elk van de apparaten een maximaal vermogen levert aan een of ander opslagsysteem dat opgeladen wordt als de vermogensvraag van het gezin kleiner is dan 417 Watt en wat te hulp schiet als de vermogensvraag groter wordt. We zien even af van de vraag hoe dat zou moeten. Maar de onderzoeksvraag is nu wel duidelijk:

Opdracht 12 Blue energy
Hoeveel vermogen kun je maximaal opwekken met de kleine Blue Energy installatie van figuur 23? En hoeveel rivierwater en zeewater zijn nodig per Watt geleverd vermogen?

Voorbereiding
Welke factoren zijn van belang? Welke grootheden kun je variëren?
Hoeveel een installatie van figuur 23 levert hangt van een aantal factoren af. De stroomsnelheid van zowel het zeewater als het rivierwater kan worden gevarieerd. Bij een hoge stroomsnelheid kunnen de concentraties minder veranderen. Dan daalt het verschil in concentratie minder snel en zal het lampje dus feller branden. Maar er wordt wel minder energie onttrokken per liter instromend water. De energiebron wordt dus minder goed benut. Wil je meer energie onttrekken (bijvoorbeeld omdat er niet genoeg water door de rivier wordt aangevoerd) dan moet het water langer in de centrale blijven maar dan is het gemiddeld verschil in concentratie kleiner en brandt het lampje dus minder fel. Wij zijn op zoek naar het maximaal vermogen en we zetten de kranen dus gewoon open. Het vermogen van de centrale dat de centrale levert hangt ook af van de uitwendige weerstand. In dit geval is dat de weerstand van het lampje. Is de weerstand van het lampje heel laag dan loopt er veel stroom. Maar

dan is de spanning over het lampje gedaald want de stroom veroorzaakt warmteverliezen in de centrale. Neem je een grotere weerstand dan daalt de stroom maar stijgt de spanning. Wat heeft dit voor gevolgen voor het vermogen dat de centrale levert?
Hoe hangt het vermogen P af van de aangesloten weerstand?
Hoeveel rivierwater en zeewater is nodig voor de levering van 1 kW vermogen?
Om de eerste vraag te beantwoorden moeten spanning en stroomsterkte gemeten worden. De spanning kan worden gemeten met de voltmeter uit figuur 23. De stroomsterkte zou rechtstreeks gemeten kunnen worden met behulp van de ampèremeter maar kan natuurlijk ook berekend worden met de formule U=I*R
Bij de uitvoering hoort ook het aanmaken van een tabel waarin de waarnemingen worden genoteerd:

R (Ohm)	U(volt)	I (Ampère)	P(Watt)

De te meten variabele is dus de spanning U. De te kiezen variabele (instrumentele variabele) is de grootte van de aan te sluiten weerstand R.
Nodig is dus een set weerstanden. Zorg dat je kunt beschikken over weerstanden van 1 Ohm tot 1000 Ohm want je moet zelf een aantal weerstanden kiezen die de invloed van de weerstand op de spanning goed weergeven. Welke weerstandswaarden je kiest laat je afhangen van enkele proefmetingen. De controlevariabelen zijn de variabelen die je constant moet houden maar waar je de waarde wel van wilt kennen. Om te beginnen de zoutconcentraties. Gebruik als rivierwater water uit de kraan. Het zeewater maak je door toevoeging van zout aan kraanwater. Voeg 30 g zout per liter kraanwater toe.
Markeer de vloeistofniveaus en zorg voor voldoende extra voorraad want tijdens het experiment moet het water in de reservoirs op niveau blijven want zonder bijvullen zal de stroomsnelheid van het water afnemen.

Ook de doorstroomsnelheid van het water is in dit experiment een controlevariabele. Deze moet dus gemeten worden. Dit kan door bijvoorbeeld de tijd te meten die nodig is om 100 ml door de opstelling te laten lopen. Dus nodig: stopwatch en maatcilinder.
Ook een variabele die van belang zou kunnen zijn is de temperatuur. Daarvoor is een thermometer nodig.
Als dit allemaal is gedaan en klaargelegd kan het experiment beginnen.

Uitvoering

- Meet de temperatuur in het lokaal.
- Open de kraan van het zeewaterreservoir en meet met een stopwatch hoeveel tijd nodig is om 100 ml door de centrale te laten lopen. Sluit de kraan weer. Doe hetzelfde met het zoetwaterreservoir.
- Meet de spanning van de centrale als er geen weerstand op is aangesloten. En noteer deze in je tabel op de onderste rij in de tweede kolom. In de eerste kolom geef je voor de weerstand het symbool voor oneindig op.
- Sluit nu een hoge weerstand aan. Als de spanning niet zakt, kies je een kleinere weerstand. Bij de eerste weerstand waarbij de spanning duidelijk lager ligt dan de Open Circuit Voltage noteer je de spanning op de een na onderste rij en tweede kolom.
- Kies nu zelf de weerstanden zodanig dat bij afnemende weerstand de afgelezen spanning naar nul toe gaat. (Let op: de stroomsterktes nemen wel toe!) Noteer weerstandswaarden en hun bijbehorende spanningen. Laat de bovenste rij leeg.
- Meet de kortsluitstroom rechtstreeks met een ampèremeter. Noteer deze in de bovenste rij.
- Ga aan de hand van je metingen na of je een mooi verband hebt gemeten of dat er nog aanvullende metingen nodig zijn.
- Sluit het experiment af en ruim op.

Verslaglegging

- Noteer het doel van het experiment.
- Beschrijf de experimentele procedure.
- Vermeld de uitkomsten met betrekking tot de controlevariabelen. Vraag aan de scheikundeleraar wat de zoutconcentratie van kraanwater is. Vermeld de omgevingstemperatuur tijdens het experiment. Vermeld de doorstroomsnelheden van het zoute water en het zoete water met de bijbehorende meetwaarden.
- Bereken de waarden voor stroom en vermogen en vul die in de tabel.
- Maak een grafiek van vermogen tegen weerstand.
- Geef antwoord op de vraag: hoeveel vermogen kan de proefcentrale maximaal leveren?

- Hoeveel zeewater en rivierwater moet per seconde door de centrale gaan per geleverde watt bij maximaal vermogen?
- Dus hoeveel zee- en rivierwater zijn nodig geweest voor de levering van 1 kJ?

Na zo'n uitvoerig onderzoek ben je toe aan het schrijven van een wetenschappelijk artikel. Dat artikel moet antwoord geven op de vraag hoe met behulp van centrales zoals boven een huishouden van energie kan worden voorzien op de wijze zoals weergegeven in figuur 24. De eisen die het huishouden stelt zijn dus: 10 kWh verbruik per dag. De totale installatie geeft via een omvormer de energie aan een opslagsysteem. Het actieve gedeelte van de opstelling uit figuur 24 heeft een volume van 0,5 liter. Daarmee kan het minimale volume van de hele installatie worden bepaald. Ook dit moet in het artikel worden gedaan. De hele opdracht staat samengevat in het kader.

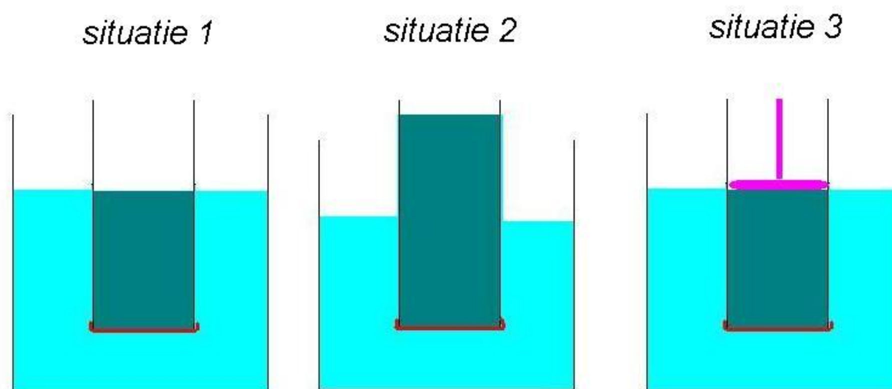
Hoofdstuk 3: Hoe is Blue Energy mogelijk?

Om te begrijpen waarom menging van zoet en zout water energie kan opleveren is het nodig om de thermodynamica ofwel de warmteleer te bestuderen.
In dit hoofdstuk

- leer je het verschijnsel osmose kennen;
- maak je kennis met de hoofdwetten van de thermodynamica;
- leer je methoden kennen om na te gaan of bepaalde processen zich wel of niet spontaan kunnen voltrekken.
- Maak je kennis met het begrip *"Vrije energie".*

3.1 Een merkwaardige proef

Bekijk onderstaande opstelling. Een buisje is aan de onderkant afgesloten met een worstvel van darm gemaakt. (Van de keurslager dus). Het buisje wordt halfgevuld met inkt. Vervolgens wordt het buisje in een bak met water gedaan zodanig dat de waterspiegels gelijk staan. Vervolgens wordt gewacht…… Het blijkt dat het waterniveau in het buisje gaat stijgen...



Figuur 25 Een Oplossing met inkt is afgesloten van een hoeveelheid zuiver water middels een semipermeabel membraan (situatie 1). Door osmose zal de hoeveelheid warmte in de ruimte met inktoplossing toenemen (situatie 2). Door grote druk uit te oefenen kan het water weer uit de oplossing worden geduwd (situatie 3).

Voor de verklaring moeten we kijken naar de moleculen. Er zijn twee soorten moleculen: watermoleculen en inktmoleculen. De inktmoleculen kunnen blijkbaar niet door het worstenvel en de watermoleculen wel. Blijkbaar bestaat er een tendens tot menging. De menging is hier niet mogelijk door de inktmoleculen maar wel door de watermoleculen. In situatie 2 is te zien dat er zwaarte-energie is ontstaan. Dat kan alleen ontstaan uit een andere vorm van energie vanwege de wet van behoud van energie. Blijkbaar is er situatie 1 een vorm van energie die niet direct zichtbaar is. Bij menging komt deze energie vrij.
Het water kan overigens weer uit de oplossing geduwd worden (situatie 3). Dit wordt 'reverse osmosis' genoemd. Zo is het in principe mogelijk water te ontzilten. Hiervoor zijn echter enorme drukken nodig. Deze druk is te berekenen met de algemene gaswet als de oplossingen niet al te geconcentreerd zijn.

Osmotische waarde

De osmotische waarde is gelijk aan de druk die de opgeloste deeltjes zouden uitoefenen als ze zich als een gas in de lege ruimte zouden bevinden in die concentratie. Hieruit volgt dat de *osmotische waarde* slechts een functie is van *het aantal* opgeloste moleculen of ionen en *niet* van hun identiteit of grootte. Omdat oplossingen van veel stoffen sterk geconcentreerd kunnen zijn, kan de *osmotische waarde* (uitgedrukt in bar) zeer groot worden. De *osmotische waarde* van zeewater bijvoorbeeld is ongeveer 30 bar ($30*10^5$Pa).
De vraag zou kunnen opkomen waarom we daar meestal niets van merken. Als we een fles vullen met lucht onder een druk van 30 bar knalt hij uit elkaar. Waarom knalt een fles, gevuld met zeewater, niet uit elkaar? De oplossing van dit probleem zit hem in het gedrag van vloeistoffen. Doordat de moleculen heel dicht op elkaar zitten, ondervinden ze veel meer invloed van elkaar. Een hele kleine volumeverandering leidt al tot enorme drukveranderingen. Een vloeistof heet niet samendrukbaar (niet comprimeerbaar) omdat zelfs enorme drukken maar een hele kleine invloed hebben op het volume dat een vloeistof inneemt. Omgekeerd leidt de hoge druk van de osmose niet tot een explosieve volumeverandering die we van de gassen kennen. We bespeuren de osmotische krachten dan ook alleen als we ze willen tegengaan zoals in situatie 3 in figuur 25.

Opdracht 13

a. Schrijf de algemene gaswet op, leg uit wat de symbolen betekenen en in welke eenheden deze worden uitgedrukt.
b. Bereken de osmotische waarde van een zoutoplossing van 0,10 molair bij 20ºC.

Energiewinning uit menging van zoet en zout water.

In principe zou het mogelijk moeten zijn om de osmotische kracht arbeid te laten verrichten. In figuur 25 is te zien hoe de osmotische kracht in staat is het gewicht van een kolom water te dragen.

Opdracht 14

Bekijk figuur 25

a. Bedenk een manier om een molentje te laten draaien met behulp van de osmotische druk.
b. Toon aan dat bij jouw apparaat er geen sprake is van een Perpetuum Mobile.

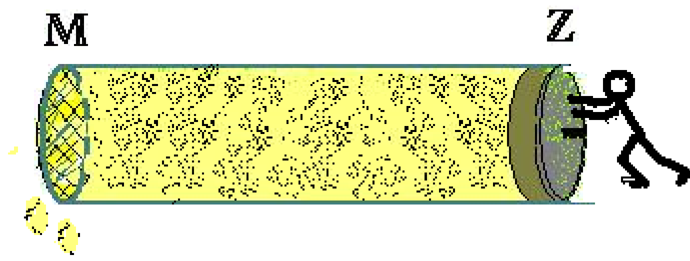
Proeven met osmose zoals in figuur 25 tonen het duidelijk aan. Zout water heeft energetische waarde. Dit komt omdat de zoutionen een druk kunnen uitoefenen volgens:

$$P = \frac{nRT}{V} = c_z RT$$

Hierin is c_z de zoutconcentratie in mol/m^3. R is de universele gasconstante:

$$R = 8{,}3145\ J/(mol * m^3)$$

Om een indruk te krijgen om hoeveel energie het hier gaat kan een gedachte-experiment worden uitgevoerd waarbij arbeid wordt verricht om een zoutconcentratie van een oplossing te verhogen.
Bekijk de opstelling van figuur 26. Een cilinder met een zoutoplossing is aan een kant afgesloten met een zuiger die wrijvingloos kan bewegen. Aan de andere kant zit een semipermeabel membraan dat watermoleculen doorlaat maar zoutionen tegenhoudt.
Een denkbeeldig mannetje duwt de zuiger naar binnen. Water gaat uit de cilinder via het membraan. De zoutconcentratie neemt toe.
Het mannetje moet duwen want hij moet arbeid verrichten tegen de druk van de zoutionen in. Omdat er arbeid verricht wordt, verliest het mannetje energie en de energie van de zoutoplossing neemt toe.



Figuur 26 Een gedachte-experiment om te bepalen hoeveel energie opstelling om osmotische drukken te kunnen bepalen. De cilinder is gevuld met rivierwater met een lage zoutconcentratie. Het water kan het semipermeabele membraan passeren maar de zoutionen niet. Er moet arbeid verricht worden om het water een zoutconcentratie te geven die gelijk is aan die van zeewater. Als er tegen de osmotische kracht arbeid wordt verricht, stijgt de energie-inhoud van de oplossing. Omgekeerde: als er door de osmotische kracht arbeid wordt verricht, neemt die energie-inhoud af.

De arbeid die het mannetje moet verrichten, geeft aan hoeveel energie de oplossing krijgt. Zo is bijvoorbeeld te berekenen hoeveel energie een liter zeewater (30 g/zout per liter) moet bevatten in vergelijking met rivierwater (1 g zout per liter).
Om 1 liter water met een concentratie van 30 g/liter te krijgen zal het mannetje een volume van 30 liter rivierwater met 1 g/liter moeten comprimeren tot 1 liter. De arbeid die daarvoor nodig is, is met een integraal te berekenen.

$$W_{mannetje} = \int_{beginplaats}^{eindplaats} -F_{mannetje} * ds$$

$$W_{mannetje} = \int_{beginplaats}^{eindplaats} -F_{ionen} * ds$$

$$W_{mannetje} = \int_{beginplaats}^{eindplaats} (P_{ionen} * A) * ds$$

$$W_{mannetje} = \int_{30\ liter}^{1\ liter} -P_{ionen} * dV$$

$$W_{mannetje} = \int_{1\ liter}^{30\ liter} P_{ionen} * dV$$

$$W_{mannetje} = \int_{1\ liter}^{30\ liter} \frac{n_{ionen}RT}{V} * dV$$

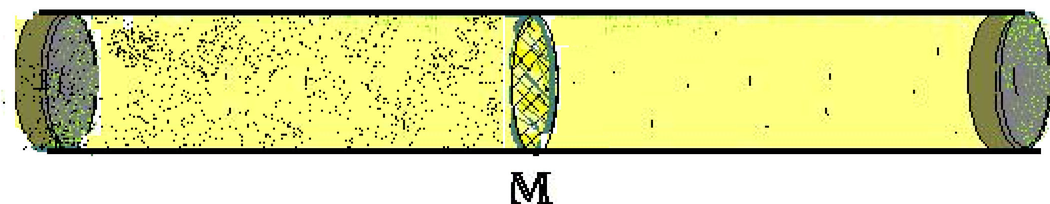
$$W_{mannetje} = n_{ionen}RT \int_{1\ liter}^{30\ liter} \frac{1}{V} * dV$$

$$W_{mannetje} = n_{ionen}RT[ln30 - ln1]$$

$$W_{mannetje} = n_{ionen}RTln(\frac{30}{1})$$

$$W_{mannetje} = 2 * \left(\frac{30}{58,8}\right) * 8,3145 * 288 * \ln\left(\frac{30}{1}\right) = 8,4kJ$$

Hieruit valt te concluderen dat als 29 liter gedestilleerd water wordt gemengd met 1 liter zeewater (30 g/l) er 8,4 kJ vrij moet komen in de vorm van warmte.
Aangezien er 4,2 kJ nodig is om 1 liter water 1°C te laten stijgen zullen we van die temperatuurstijging van de resulterende 30 liter niet veel merken.
Bij een zoet-zout-centrale wordt rivierwater met een lage concentratie gemengd met zeewater met een hoge zoutconcentratie. Ook daar komt energie bij vrij. Hoeveel energie daarbij vrijkomt kan berekend worden met het volgende model (figuur 27):
Twee verschillende zoutoplossingen worden van elkaar gescheiden door een semipermeabel membraan. Het membraan kan vrij bewegen.



Figuur 27 Als het semipermeabele membraan in het midden vrij kan bewegen schuift het naar rechts en komt er energie vrij in de vorm van warmte.

De ionen in de zoute oplossing zullen arbeid verrichten. Het membraan schuift op naar rechts. Het zoute water zal energie verliezen doordat de zoutconcentratie afneemt.

Tegelijkertijd zal de zoutconcentratie van de andere oplossing toenemen en daarmee de energie van deze oplossing.
Netto zal er energie vrijkomen. Dat zal in de vorm van warmte zijn. Maar hoeveel is dat dan?

Opdracht 15
Bekijk figuur 27. Het membraan zit vast en wordt op een zeker moment losgelaten. Het membraan gaat nu bewegen. Neem aan dat het zoute water links van het semipermeabele membraan een volume heeft van een liter en een zoutconcentratie heeft van 30 g/l. Rechts zit een liter met een zoutconcentratie van 1 g/l. De temperatuur van de hele opstelling bedraagt 20ºC.
Het membraan zal zover opschuiven dat evenwicht ontstaat en het membraan tot stilstand komt.

a. Bereken het eindvolume van beide ruimtes en de nieuwe zoutconcentratie.
b. Het zoete water heeft een grotere zoutconcentratie gekregen. Daarvoor is energie nodig geweest. Bereken deze energie en volg daarbij het voorbeeld hierboven.
c. Het zoute water verliest juist energie. Bereken ook deze hoeveelheid energie.
d. Bereken hoeveel energie daarbij totaal vrijkomt.

Numerieke analyse

Numerieke analyse maakt het mogelijk om een proces stapje voor stapje te simuleren waarbij elk stapje zo klein is dat de toestandsgrootheden die het systeem beschrijven tijdens een stapje niet merkbaar veranderen (bijvoorbeeld doordat ze niet veranderen binnen de marge van de significantie van de beginwaarden van het proces).
Pas na een aantal stapjes is te zien hoe de toestandsgrootheden veranderen.
Numerieke analyse kan worden gedaan met Coach of een andere modelleeromgeving maar het kan ook met Excel worden gedaan.
Hieronder wordt een model beschreven voor de menging van 1,0 liter rivierwater in een grote hoeveelheid zeewater. Eerst worden startwaarden opgegeven. Deze moeten in de juiste eenheden worden opgegeven.

Vervolgens wordt per stapje uitgerekend:

de netto-kracht op de zuiger: $F = (p_{uit}-p_{in})*A$
de arbeid per stapje $dW = F*ds$
de totaalarbeid W
de nieuwe cilinderinhoud
de nieuwe osmotische waarde van de cilinderinhoud.

Dit levert het volgende model:

Startwaarden

R:=	8,3145	universele gasconstante in J/(mol.K)
T:=	298	absolute temperatuur in K
cmz:=	30	massaconcentratie van het zout in zeewater in g/liter
cz:=	2*cmz*1000/58,8	ionenconcentratie zeewater in mol/m^3
pz: =	R*T*cz	osmotische waarde van het zeewater in Pa
m:=	1,0	massa zout in een liter rivierwater in gram
n:=	2*m/58,44	aantal mol ionen in de cilinder in mol
V:=	0,0010	inhoud cilinder aan het begin in m^3
cr:=	n/V	ionenconcentratie binnen de cilinder in mol/m^3
pr :=	R*T*cr	osmotische waarde van de cilinderinhoud in Pa
dV:=	1,0 E-6	verandering van volume per stapje in m^3
A:=	0,25 E -4	oppervlakte van de zuiger in m^2
l:=	V/A	afstand tussen zuiger en membraan in m
ds:=	dV/A	stukje dat zuiger opschuift per stapje in m
W:=	0	totale arbeid die is verricht in J

Model:

Herhaal

F:=	(pz-pr)*A	kracht op zuiger wordt berekend
dW:=	F*ds	arbeid berekenen om ds op te schuiven
W:=	W + dW	totale arbeid berekenen
V:=	V – dV	nieuwe volume bepalen
cr:=	n/V	nieuwe zoutconcentratie bepalen
pr:=	R*T*cr	nieuwe druk in cilinder bepalen

tot dat pr > pz

Opdracht 16

a. Bepaal met dit model hoeveel mengenergie vrijkomt als 1,0 liter rivierwater met een zoutconcentratie van 1,0 g/liter in de zee wordt gebracht.

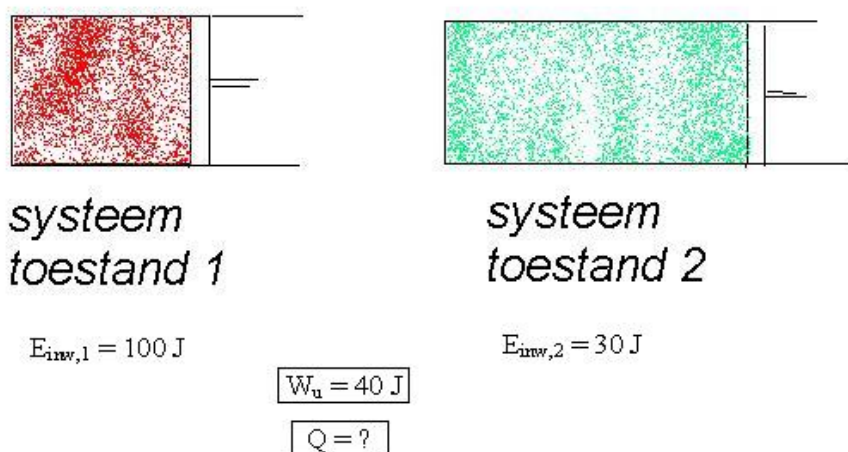
b. Pas het model aan om uit te rekenen hoeveel energie vrijkomt als je 1,0 liter zeewater mengt met een liter rivierwater.

c. Bepaal hoeveel energie vrijkomt als een liter met 4,0 gram NaCl vermengd wordt met 10 liter met een zoutgehalte van 85 g/liter.

3.2 De eerste hoofdwet van de thermodynamica

De eerste hoofdwet van de thermodynamica luidt dat energie altijd blijft behouden.
Als energie wordt toegevoerd aan een systeem kunnen er twee dingen gebeuren:
De energie van het systeem verandert en/of het systeem verricht arbeid op de omgeving.
Met een voorbeeld kan dit worden toegelicht.
Veel scheikundige processen en vrijwel alle biologische processen vinden plaats bij constante druk. In weefsels kunnen geen grote drukverschillen worden opgevangen.

Weefsels kunnen wel eenvoudig worden opgerekt. En bij scheikundige reacties ontstaan vaak een of meerdere gassen. De reactieproducten nemen dan meer ruimte in dan de oorspronkelijke stoffen. Om dit grotere volume te kunnen innemen hebben de reactieproducten arbeid moeten verrichten. Voor deze arbeid is energie nodig. Bij een exotherme reactie komt dan ook minder warmte vrij bij vrije expansie dan wanneer deze reactie plaatsvindt in een ruimte met vast volume waarbij de druk sterk zou toenemen. Neem nu eens aan dat een exotherme chemische reactie plaats vindt waarbij gassen ontstaan die de lucht wegdrukken. Hieronder is dat in een figuur weergegeven met hypothetische getallen er bij.



Figuur 28 Illustratie van de eerste hoofdwet van de warmteleer: de energievermindering van een systeem is gelijk aan de arbeid op de omgeving + de warmte die naar de omgeving is gestroomd.

In het voorbeeld hebben we een systeem waarbij de moleculen totaal een energie hebben van 100 J. Dit is de som van alle energievormen waarover de moleculen beschikken en dat is dus zowel de chemische energie (de energie die ligt opgeslagen in de atoombindingen als de verschillende vormen van bewegingsenergie van de moleculen. Na de reactie is die energie veranderd. De scheikundige reactie heeft plaatsgevonden en de moleculen bevatten nu aanzienlijk minder chemische energie. Het kan zijn dat de temperatuur in toestand 2 hoger is en dat betekent dat de moleculen wel sneller bewegen. De totale inwendige energie (de energie van de moleculen) is echter afgenomen. In toestand 2 neemt het systeem nu meer ruimte in. Er is dus arbeid verricht op de omgeving.
Tot slot kan er warmte in of uit het systeem gegaan zijn.
Dat zou dus een derde energiestroom zijn.
De eerste hoofdwet van de warmteleer luidt nu dat de totale energie altijd behouden blijft.
In bovenstaand voorbeeld geldt dus:

- De inwendige energie neemt af met 70 J: $\Delta E_{inw} = - 70$ J
- De arbeid op de omgeving heeft er toe geleid dat het systeem meer ruimte inneemt en vertegenwoordigt ook een hoeveelheid energie.(Bij krimp komt energie weer beschikbaar.) Er geldt hier $W_u = +40$ J.

- Er moet warmte naar de omgeving gevloeid zijn ter waarde van 30 J want anders zou de wet van behoud van energie geschonden zijn. Het is gebruik om warmtetoevoer positief te rekenen en warmteafvoer negatief.: Q = -30 J

Heel algemeen geldt de eerste hoofdwet van de warmteleer:

$$Q = \Delta E_{inw} + W_u$$

Voor endotherme reacties gaat de formule ook op.
Is er warmtetoevoer (Q>0) dan gaat de energie voor een deel naar de moleculen (ΔE_{inw}>0) en het kan zijn dat er sprake is van expansie (W_u>0).

Voor de arbeid ("volumearbeid") die een systeem verricht geldt:

$$W = p * \Delta V$$

met:

W	=	Arbeid in joules
P	=	Druk in Pascal (Pa)
ΔV	=	Volumeverandering (m^3): bij expansie geldt: ΔV>0 en bij krimp ΔV<0.

Dat deze formule in boven getekende situatie moet gelden volgt onmiddellijk uit

W	=	F * Δs (kracht van de gassen op de zuiger * verplaatsing van de zuiger)
	=	p*A* Δs (want F = druk p van de gassen * oppervlak van de zuiger A)
	=	p* ΔV (Want zuigeroppervlak * verplaatsing = expansie ΔV)

In de thermodynamica wordt vaak gewerkt met het begrip enthalpie (H). Enthalpie van een systeem is de inwendige energie van een systeem vermeerderd met een grootheid die een maat is voor de energie die correspondeert met het innemen van ruimte.

$$H = E_{inw} + pV$$

Voor processen die verlopen bij constante druk (dus voor veel scheikundige processen en alle biologische processen) geldt dan:

$$\Delta H = \Delta E_{inw} + p\Delta V$$

De eerste hoofdwet van de thermodynamica kan dus nu in een nieuwe vorm worden gegoten.

$$Q = \Delta H$$

De enthalpieverandering is blijkbaar eenvoudig te meten door naar de warmte te kijken die in of uit het systeem vloeit. Plaats het hele systeem in een bak water en kijk naar de temperatuurverandering van het water. Een thermometer is dan voldoende! In de Binas is voor veel reacties de molaire enthalpieverandering in J/mol gegeven.

Overigens is de volume-arbeid doorgaans veel kleiner dan de verandering in inwendige energie van een systeem. Het onderscheid tussen enthalpie en inwendige energie valt dan weg en in deze module wordt dan ook gewoon gesproken over de energie van een systeem.

3.3 De tweede hoofdwet van de thermodynamica

Wat gebeurt er als je een ei in de hete pan doet?
Twee processen vinden plaats: een exotherm proces: het verbranden van het gas en een endotherm proces (het bakken van een eitje). Het verbranden van het gas vindt spontaan plaats. Het bakken van het ei ontstaat door toevoer van warmte. De gedachte dringt zich op: kan het zijn dat exotherme reacties spontaan verlopen en endotherme reacties niet?
Rolt een balletje niet altijd naar het laagste punt van een dal (vooropgesteld dat het soms kan zijn dat er een duwtje nodig is om een plaatselijk obstakeltje te overwinnen) (activeringsenergie)? Zoekt een systeem niet altijd het punt op van de minste energie? Dat wil zeggen streeft een systeem naar minimale enthalpie?

We signaleren een tendens:

Een systeem streeft naar verlaging van de enthalpie: $\Delta H<0$

Maar dit kan toch niet de enige drijfveer in de natuur zijn. Als je een ammoniumzout in water gooit, lost het spontaan op maar de oplossing wordt ijskoud en er stroomt onmiddellijk warmte uit de omgeving naar de oplossing toe. Deze endotherme reactie wordt gebruikt om blessures te behandelen in de sportwereld.
Ook bij verdamping van water neemt de enthalpie van een systeem toe. Zelfs heel sterk: om een liter water geheel te verdampen is 2,3 MJ nodig. Stoom van 100^0C is veel gevaarlijker dan kokend water van 100^0C omdat de stoom zoveel energie bevat.

Waarom streven deze systemen hier niet naar minder energie? De conclusie is dat er naast de genoemde tendens nog een andere drijfveer in de natuur moet zijn.

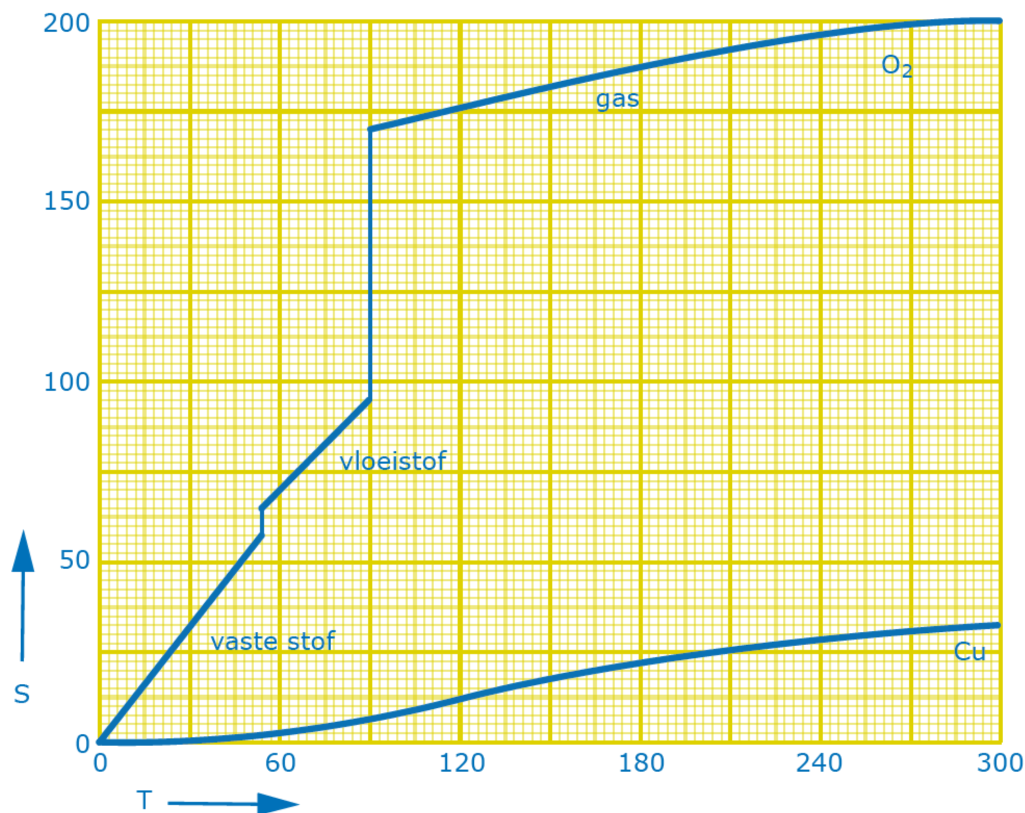
Een van de belangrijkste wetten uit de natuurkunde is de Tweede Hoofdwet van de thermodynamica. Deze wet stelt dat bij elke gebeurtenis in de natuur de entropie moet toenemen. Om in te zien wat hiermee wordt bedoeld kijken we eens naar de verzameling knikkers in figuur 29.

Alle knikkers liggen door elkaar. Dit is wat je verwacht als je de knikkers willekeurig in een doos stort en deze door elkaar schudt. Als alle witte knikkers links hadden gelegen en alle donkere knikkers rechts zouden we hebben aangenomen dat er een ordenende kracht aan het werk was geweest. De toestand van de knikkers is een ongeordende. Er zijn zeer vele van deze toestanden. Laten we het aantal mogelijkheden waarop je bovenstaande knikkers kunt neerleggen N noemen. N is groot. Maar wat is groot? In een knikker zitten zo'n 10^{24} atomen. Dat is veel. Zo'n getal kun je je niet meer voorstellen. Het volgende beeld kan wellicht helpen. Neem een emmer. Vul hem met vogelzand: dat hele fijne zand. In die emmer zitten dan ongeveer een miljard korreltjes (10^9). Voor een biljoen (1000x zoveel) heb je dan een kamer nodig vol met dat zand. Maar dan heb je nog steeds maar 10^{12}. Vervang nu elk korreltje in die kamer op tot een nieuwe kamer vol zandkorrels. Mensen met een gevoelige intuïtie zien in: het gaat hier om een gedachtenexperiment! Nu heb je het getal 10^{24} gekregen. Dus het aantal atomen in een knikker is groot!


Figuur 29 Een toestand van grote entropie

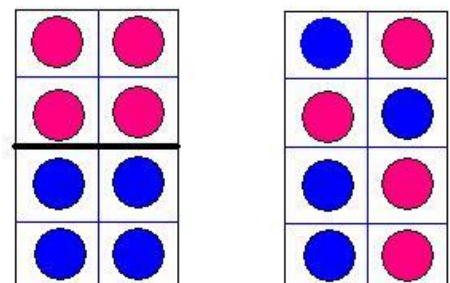
Maar N is groter. Veel groter. Het heeft nu geen zin meer om je nog een voorstelling daarvan te maken.
De knikkers kunnen ook op een herkenbare manier worden neergelegd. Wit bij wit, groot bij groot. Ongetwijfeld zijn er nog vele ordeningsmogelijkheden maar vergeleken met N is dat aantal klein. Verschrikkelijk klein. Dus: de kans dat je bij gewoon schudden een dergelijke geordende toestand krijgt is verschrikkelijk klein. Van belang is kennelijk het aantal realiseringsmogelijkheden van een systeem. Dit geven we aan met het begrip entropie.

Entropie is dus een maat voor het aantal realiseringsmogelijkheden. Een systeem heeft een grote entropie als de deeltjes in dat systeem veel mogelijkheden hebben om te bewegen. Een mooi voorbeeld is verwarming. Als de temperatuur van een systeem toeneemt, krijgen de deeltjes meer energie en daardoor meer bewegingsvrijheden. De entropie neemt dus toe met de temperatuur.
Een tweede voorbeeld is faseverandering. Een vloeistof heeft meer entropie dan een vaste stof want in een vaste stof hebben alle deeltjes een vaste plaats. Bij verdamping van een vloeistof krijgen de deeltjes veel meer ruimte waardoor de entropie nog verder toeneemt.
In het onderstaande figuur is weergegeven hoe de entropie van een mol water toeneemt als gevolg van de stijging van temperatuur en faseverandering.



Figuur 30 De entropie van één mol zuurstof en van één mol koper.

Voor heel eenvoudige systemen kan het aantal realiseringsmogelijkheden
rechtstreeks worden berekend. Bekijk onderstaand voorbeeld:



Figuur 31 In de situatie rechts is de entropie groter dan in de situatie links.

Een ruimte met rode bolletjes is afgescheiden van een ruimte met blauwe bolletjes door middel van een scheidingswand. In de situatie links kunnen de rode bolletjes onderling van positie verwisselen. Hetzelfde geldt voor de ruimte met de blauwe bolletjes.
Er is maar één toestand herkenbaar. In een dergelijk geval heeft zo'n systeem een entropie nul.
De schuif wordt nu weggehaald. Hierdoor neemt de entropie toe.

Opdracht 17

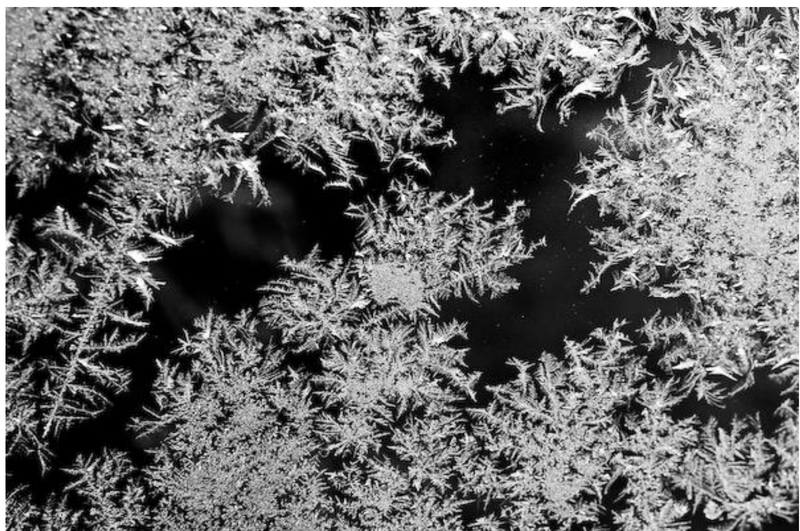
a. Bereken het aantal realiseringsmogelijkheden (het aantal verschillende toestanden) van figuur 29, situatie rechts.
b. Hoe groot wordt het aantal realiseringsmogelijkheden bij verdubbeling van het aantal hokjes van het systeem?
c. Hoe groot is het aantal realiseringsmogelijkheden van 50 rode knikkers en 50 blauwe knikkers in een vat waarin plaats is voor 100 knikkers?
d. Geef twee redenen waarom men in de natuurkunde liever werkt met de logaritme van een aantal realiseringsmogelijkheden dan met dat aantal zelf.

Voor het geval boven is elke realiseringsmogelijkheid een goed herkenbare toestand.
In fysische systemen is het aantal realiseringsmogelijkheden zo groot dat dat niet langer mogelijk is. Een voor ons herkenbare toestand heeft vele realiseringsmogelijkheden.
In het algemeen geldt dat we een onderscheid maken tussen geordende en ongeordende systemen. Bij ongeordende systemen is dan het kenmerk dat het aantal realiseringsmogelijkheden veel groter is dan dat bij geordende systemen.
Spontane veranderingen van het systeem door externe krachten zal dan ook doorgaans leiden tot ongeordende toestanden.
Als er windhoos met onbeperkte energie en kracht huishoudt op een parkeerplaats met auto's is het theoretisch misschien mogelijk dat er na afloop een splinternieuwe Boeiing 747 klaarstaat maar die uitkomst is toch min of meer onwaarschijnlijk. De entropie van de nieuwe situatie is daarvoor te klein.

We kunnen een tendens formuleren gebaseerd op de wetten van de statistiek:

Een systeem streeft naar verhoging van de entropie: $\Delta S > 0$

En toch: ook hier is geen sprake van een wet van Meden en Perzen. Er zijn uitzonderingen. Hoe zouden immers zulke onwaarschijnlijk geordende structuren als een ijskristallen in de winter op een ruit ontstaan?



Figuur 32 IJskristallen op een ruit: spontane ordening.

De verklaring is dat het systeem entropie kan exporteren naar de omgeving.
Neem het voorbeeld van de ijskristallen. De watermoleculen, aangekomen bij de ruit staan warmte af aan de omgeving. Met deze warmtestroom leveren de watermoleculen heel veel entropie in want ze vormen geordende patronen. Maar er stroomt warmte naar de ruit. De glasmoleculen krijgen dus veel entropie.
Voor processen die spontaan verlopen zal altijd moeten gelden dat de totale entropie groter wordt: dus

$$\Delta S_{systeem} + \Delta S_{omgeving} > 0$$

Dit is geen tendens maar een wet: de tweede hoofdwet van de warmteleer.
Eigenlijk houdt deze in dat bij iedere gebeurtenis de waarschijnlijkheid van het universum in zijn geheel groter moet worden.

Entropieveranderingen kunnen worden gemeten. Ze corresponderen namelijk met warmtestromen. Stroomt er warmte naar een systeem dan geldt immers dat de moleculen meer energie krijgen en die energie kan op heel veel verschillende manieren over die moleculen worden verdeeld.
Hoe zou ooit $\Delta S_{omgeving}$ gemeten kunnen worden?

De formule luidt:

$$\Delta S_{omgeving} = \frac{Q_{omgeving}}{T}$$

Hierin is $Q_{omgeving}$ de warmte die de omgeving opneemt of afstaat.
Het bewijs is te gecompliceerd om hier te geven maar we kunnen de formule aannemelijk maken.
In het geval van de vorming van ijskristallen is dus van belang hoeveel warmte de ruit opneemt. Bij een lage temperatuur heeft toevoer van warmte volgens deze formule veel meer effect op de entropie van de ruit dan bij hogere temperaturen. Clausius, die deze formule als eerste heeft voorgesteld heeft het wel eens vergeleken met het luiden van een gong. In een doodstille omgeving is het effect veel groter dan in een drukke vergaderzaal. Vandaar dat de warmtestroom wordt gedeeld door de temperatuur.

We herschrijven nu de 2^e^ hoofdwet zo dat hij beter te hanteren is.
Warmte die naar de omgeving stroomt is warmte die uit de ijskristallen komt:

$$Q_{omgeving} = -Q_{systeem}$$

En $Q_{systeem} = \Delta H_{systeem}$ (eerste hoofdwet)

Dus:

$$S_{systeem} - \frac{\Delta H_{systeem}}{T} < 0$$

Zoals te zien is, is er nu geen kennis meer nodig over de omgeving. Het systeem levert alle informatie. Dit herschrijven we tot een formule waar we mee kunnen werken:

$$\Delta H - T * \Delta S < 0$$

Deze wet regeert de processen in de natuur. We vinden hierin ook de twee tendensen terug die we eerder hebben gesignaleerd.
Met name in de scheikunde wordt vaak met deze vergelijking gewerkt om voorspellingen te kunnen doen over het verloop van reacties.
Vier situaties kunnen worden onderscheiden:

Exotherme reacties waarbij de entropie van het systeem toeneemt.

Dus $\Delta H<0$ en $\Delta S>0$. Afgezien van de barrière van de activeringsenergie die genomen moet worden, staat niets het verloop van dit proces in de weg. Aardgas in een ruimte waarin ook zuurstofgas aanwezig is, zal (op explosieve wijze) transformeren tot waterdamp en CO_2. Het enige dat nodig is, is een kleine vonk om de activeringsenergie te overwinnen.

Endotherme reacties waarbij de entropie van het systeem afneemt.

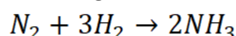
Dus $\Delta H>0$ en $\Delta S<0$. Deze processen zijn onmogelijk. Wil het proces toch plaatsvinden dan moet energie van buitenaf worden toegevoerd. (zodat ΔH alsnog negatief wordt). Een voorbeeld is de fotosynthese. Spontaan kan uit water en CO_2 geen glucose en zuurstof ontstaan. Dat het toch gebeurt komt omdat de plant zonnestraling weet in te vangen en te gebruiken.

Endotherme reacties waarbij de entropie van het systeem toeneemt.

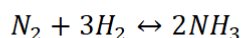
Dus $\Delta H>0$ en $\Delta S>0$. De uitkomst is niet onmiddellijk voorspelbaar. Het is maar net welk effect het sterkst is: het enthalpie-effect of het entropie-effect. Als het laatste gebeurt, levert dat soms verrassende effecten op. Als je een ammoniumzout oplost in water, bijvoorbeeld, daalt de temperatuur. Er wordt dus warmte onttrokken aan de omgeving. Dit wordt toegepast bij cool-packs.

Exotherme reacties waarbij de entropie van het systeem afneemt.

Dus $\Delta H<0$ en $\Delta S<0$. Ook hier is niet op voorhand te zeggen wat er gebeurt.
Een voorbeeld is de vorming van ammoniakgas uit stikstof en waterstofgas.


$$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$$

De entropie neemt hier af omdat het aantal deeltjes kleiner wordt en daarmee het aantal realiseringsmogelijkheden van het systeem. Maar het enthalpie-effect kan de reactie toch mogelijk maken mits maar voldaan is aan de eis $\Delta H - T^* \Delta S < 0$
Als de temperatuur hoog wordt gaat het tweede effect domineren. De omgekeerde reactie wordt mogelijk. Er ontstaat een reactie-evenwicht:


$$N_2 + 3H_2 \leftrightarrow 2NH_3$$

Voor de reactie naar rechts moet vanwege de hoge activeringsenergie overigens een katalysator worden toegevoegd.

Opdracht 18

Bereken:

a. De volumeverandering bij de verbranding van 1 mol stearinezuur ($C_{18}H_{36}O_2$). Stel het molaire volume van gassen op 25 L (=0,025 m^3)

b. De hiermee gepaard gaande arbeid pΔV. Stel $p = 10^5\ N\ m^{-2}$.

c. Het procentuele verschil tussen ΔE en ΔH voor de verbranding van stearinezuur (ΔH = - 11 362 kJ mol^{-1}).

Opdracht 19

Hoe groot is de entropietoename (ΔS) als we 12 g zuurstof verwarmen van 80 K tot 180 K ($p = p_0$)? Gebruik hiervoor figuur 30.

Opdracht 20

We verwarmen 1 mol O_2 en 1 mol H_2O van 220 K tot 400 K ($p = p_0$). De entropietoename van H_2O blijkt veel groter te zijn dan die van O_2. Geef hiervoor een verklaring.

Opdracht 21

Als bij een proces de entropie toeneemt is ΔS positief en neemt de entropie af dan is ΔS negatief. Beredeneer of de entropie verandert en hoe deze verandert bij de volgende processen:

a. $CaCO_3$ (s) → CaO (s) + CO_2 (g)

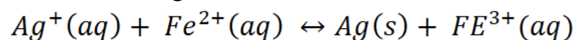
b. Ba^{2+} (aq) + SO_4^{2-} (aq) → $BaSO_4$ (s)

c. H_2O (l) → H_2O (g)

d. N_2 (g) + 3 H_2 (g) → 2 NH_3 (g)

Opdracht 22

Indien we een Oplossing van zilvernitraat mengen met een oplossing van ijzer(II)sulfaat, zal zich het volgende evenwicht instellen:



$$Ag^{+}(aq) + Fe^{2+}(aq) \leftrightarrow Ag(s) + FE^{3+}(aq)$$

Beredeneer op grond van entropie overwegingen, of hierbij het enthalpie-effect voor de reactie naar rechts positief of negatief zal zijn.

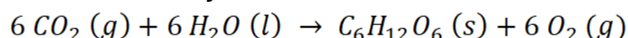
Opdracht 23

Als de temperatuur maar hoog genoeg wordt vallen alle moleculen uiteen in atomen. Dit proces heet *dissociatie*. Voor de dissociatie van Cl_2-moleculen in de gasfase bedraagt de enthalpieverandering 243 kJ mol^{-1}. De entropieverandering voor dit proces bedraagt 109 J K^{-1} mol^{-1}.

a. Is dissociatie van chloor bij 25 ºC een spontaan proces? Licht toe met een berekening.

b. Bereken de minimale temperatuur die vereist is om de dissociatie van chloor te laten verlopen.

Opdracht 24
Groene planten kunnen met behulp van zonlicht glucose maken uit koolstofdioxide en water. Dit proces heet *fotosynthese*.

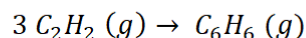

$$6\,CO_2\,(g) + 6\,H_2O\,(l) \;\rightarrow\; C_6H_{12}O_6\,(s) + 6\,O_2\,(g)$$

a. Bereken de reactie-enthalpie van dit proces.
b. Bereken de entropieverandering tijdens het fotosyntheseproces, als gegeven is dat de absolute entropie van glucose 212 J K^{-1} mol^{-1} bedraagt. Overige gegevens staan in tabel 63 van het Binas.
c. Bereken de waarde van ΔG voor de vorming van één mol glucose bij 25ºC en 1 bar.
d. De bij c berekende waarde is negatief. Verklaar waardoor het fotosyntheseproces toch kan optreden.

Opdracht 25
Bij een ongeluk is een grote hoeveelheid acetyleen (ethyn) vrij gekomen. Men vraagt zich af of het carcinogene benzeen zou kunnen ontstaan. Met een proefopstelling wordt dit probleem onderzocht.



In een cilinder die is afgesloten met een zuiger bevindt zich ethyn. De temperatuur in de cilinder is 25ºC en de druk van de buitenlucht is 1,0 bar. De zuiger kan vrij bewegen.
De onderstaande reactievergelijking geeft aan hoe ethyn in benzeen kan worden omgezet.


$$3\,C_2H_2\,(g) \rightarrow C_6H_6\,(g)$$

De vraag rijst of te voorspellen is of dit proces optreedt bij een temperatuur van 25ºC en een druk van 1,0 bar.

a. Waarom is het voor dit onderzoek handig dat de zuiger vrij kan bewegen?
b. Neem het figuur over en laat zien waar de zuiger zou gaan staan als dit proces zich inderdaad zou voltrekken onder standaardomstandigheden.
c. Ga m.b.v. de Binas na of de reactie zich kan voltrekken.

Vrije energie

Cruciaal is dus de waarde van de grootheid $\Delta H - T^* \Delta S$.
Beide termen worden uitgedrukt in Joules. Dit is aanleiding geweest om een nieuwe systeemgrootheid te definiëren:

$$G = H - TS$$

De grootheid G wordt de (Gibbs) vrije energie genoemd.
Om de term te kunnen verklaren zou het volgend beeld kunnen dienen.
Een systeem (bestaande uit deeltjes) bevat energie. De tendens dat een systeem naar een minimale energie-inhoud streeft, is zichtbaar bij water dat een helling afstroomt. Water stroomt niet zomaar omhoog. Het water verliest energie. Maar het water verliest niet alle energie. (Dan zou het in ijs veranderen.) Een deel van de energie is niet vrij en kan niet zomaar worden afgestaan aan de omgeving.
Nog een voorbeeld:
Luchtmoleculen worden aangetrokken door de aarde. Ze hebben, net als watermoleculen, zwaarte-energie. Niettemin verzamelen ze zich niet allemaal bij het oppervlak van de aarde. Daarom hebben we een atmosfeer. De toestand die ontstaat wordt gekenmerkt door een minimale vrije energie. Overgang naar een andere toestand is alleen mogelijk als voldaan is aan de voorwaarde

$$\Delta H - T * \Delta S < 0 \; ofwel \; \Delta G < 0$$

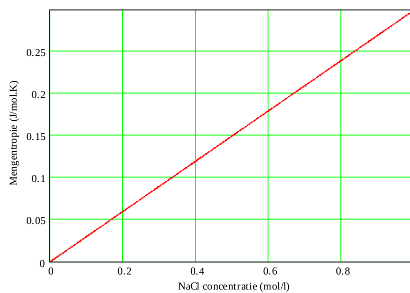
Opdracht 26
Zout en zoet water mengen spontaan tot ‘brak’ water. Menging van een liter zoet water met een liter zout water laat geen verandering van temperatuur van enige betekenis zien.
a. Wat betekent dit voor de mengenthalpie ΔH?
b. Volgens welke regel(s) mengen zoet en zout water dus?

Opdracht 27
Als het zout KCL in water wordt gedaan, splitst het spontaan in ionen en ontstaat het sterke zuur HCL en de sterke base KOH.
a. Bepaal de vormingsenthalpieën van 1 mol van de betrokken stoffen.
b. Bepaal de entropieën van de stoffen.
c. Bereken de Gibbs vrije energie van deze reactie onder standaardomstandigheden.

Opdracht 28

Bij een riviermonding zien we dus nauwelijks temperatuur-effecten. We bekijken wat er dan wel gebeurt bij een riviermonding. We volgen 1 liter rivierwater bij het uitstromen in de zee. We nemen aan dat het rivierwater nauwelijks zout bevat en dat in zee vooral keukenzout is opgelost. We nemen aan dat de molariteit van het zout in de zee niet verandert door de uitstroming van de rivier (lokale effecten verwaarlozen we). Verder verwaarlozen we temperatuurverschillen en dichtheidsverschillen van rivierwater en zeewater.

a. Hoeveel mol water bevat de liter rivierwater?
b. Wat is de beginwaarde en wat is de eindwaarde van de molariteit van NaCl in de liter rivierwater (mol/L)? Neem hiervoor een goede aanname van de molariteit van het zout in het zeewater.
c. Lees uit de grafiek af hoe groot de entropieverandering is (J/mol.K). Bepaal hoe groot de verandering van de -TΔS van de liter rivierwater is (t = 15ºC). Hoeveel energie is er verloren gegaan bij het uitstromen van de liter rivierwater (kJ)?
d. In Nederland stroomt gemiddeld 3.3 miljoen liter zoet water per seconde uit in zee. Hoeveel megawatt vermogen gaat er verloren (1 MJ/s = 1 MW)?



4 Hoe zetten we Blue Energy om in elektriciteit?

In de vorige hoofdstukken heb je geleerd dat energie gewonnen kan worden uit zoutconcentratieverschillen in rivier- en zeewater.
In dit hoofdstuk

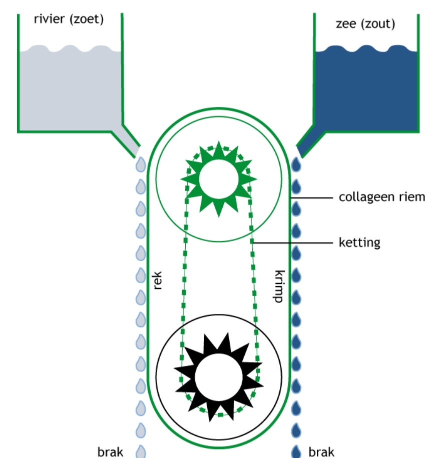
- laat je zien met welke technieken je zoutgradiënten kunt gebruiken om energie te winnen.
- leer je hoe je met membranen elektrische energie kunt opwekken uit het mengen van zoet en zout water.

4.1 Vijf productietechnieken

De voordelen van Blue Energy zijn groot. Deze energie is duurzaam, want uiteindelijk is de zon de energiebron. Er komen geen broeikasgassen vrij zoals koolstofdioxide en geen vervuilende gassen als zwavel- en stikstofoxiden. Bovendien zijn de benodigde watersoorten gratis en vrijwel ongelimiteerd voorhanden.
We bespreken vijf manieren om de zoutgradiënt te gebruiken voor energiewinning.

Katchalsky-machine

Een techniek die is bedacht door de Israëlische biofysicus Katchalsky (1914-1972). Hij constateerde dat sommige vezels in zout water krimpen en in zoet water weer rekken. In principe is dat voldoende om een machine aan te drijven en er zijn werkende modellen gemaakt. Een riem van collageen (een lijmvormend eiwit, hoofdbestanddeel van bindweefsel) draait over twee schijven (pulley's). De schijven zijn met een ketting verbonden via tandwielen met verschillende diameter. Het collageen wordt beurtelings bevochtigd door zout water waardoor het materiaal krimpt en door zoet water waardoor het weer oprekt.



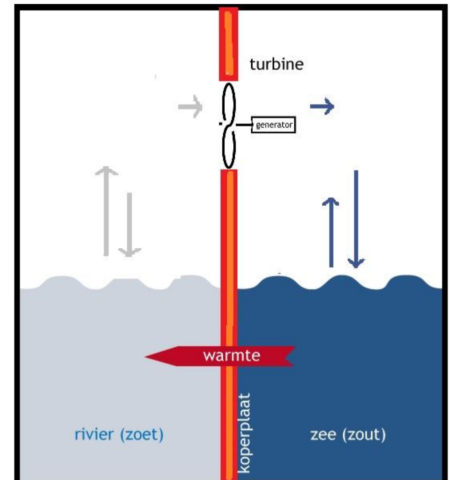
Figuur 33 Energiewinning uit zoutgradiënt. Katchalsky-machine.

Opdracht 29

a. Leg uit waarom het nodig is dat de Katchalsky machine twee tandraderen van ongelijke grootte heeft.
b. Leg uit wat de draairichting is van de riem.

*V*apor Pressure Difference Utilization (VPDU)

Deze methode maakt gebruik van het feit dat zout water langzamer verdampt dan zoet water. Zoutionen oefenen namelijk sterke aantrekkingskrachten uit op de watermoleculen zodat deze minder makkelijk ontsnappen aan de vloeistof.
Bekijk de opstelling hieronder. In de opstelling staat een vat met twee compartimenten, gescheiden door een koperen plaat. Omdat het zoete water beter verdampt is de dampdruk boven de vloeistof lager dan de dampdruk boven het zoute water. Door dit drukverschil ontstaat een waterdampstroom in de richting van het zoute water. In deze dampstroom zet een turbine de kinetische energie van de watermoleculen om in elektrische energie. Het verdampende water koelt af en wordt via de warmtewisselaar weer op temperatuur gebracht door de condensatiewarmte aan de zeewaterkant.



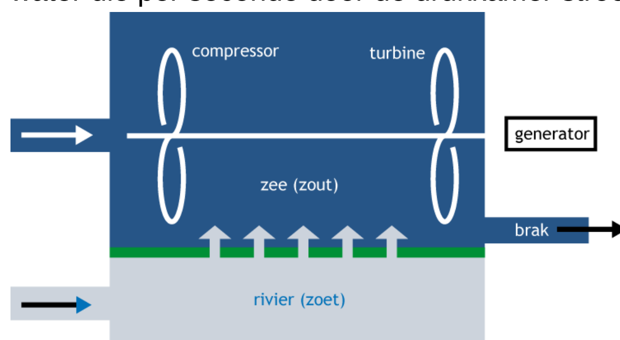
Figuur 34 Energiewinning uit zoutgradiënt. Vapor Pressure Difference Utilization.

Opdracht 30

a. Leg uit welke energieomzetting hier plaats vindt.
b. Leg uit wanneer dit proces stopt.

Pressure Retarded Osmosis (PRO)

Deze methode berust op osmose. Zout en zoet water worden in een drukkamer gepompt, van elkaar gescheiden door een halfdoorlatend membraan. Door het osmotisch drukverschil zal het zoete water door het membraan heen naar het zoutwatercompartiment stromen. Daardoor neemt in het zoutwatercompartiment de waterdruk toe, waardoor het water het compartiment uitstroomt en daarbij een turbine aandrijft.
Deze methode wordt 'pressure retarded' (druk gelimiteerde) osmose genoemd, omdat het rivierwater tegen de waterdruk in door het membraan getransporteerd wordt. Het vermogen is maximaal bij een waterdruk die gelijk is aan de helft van het osmotisch drukverschil tussen rivier- en zeewater.
Het geleverde vermogen is het product van de waterdruk en het debiet (de hoeveelheid water die per seconde door de drukkamer stroomt).



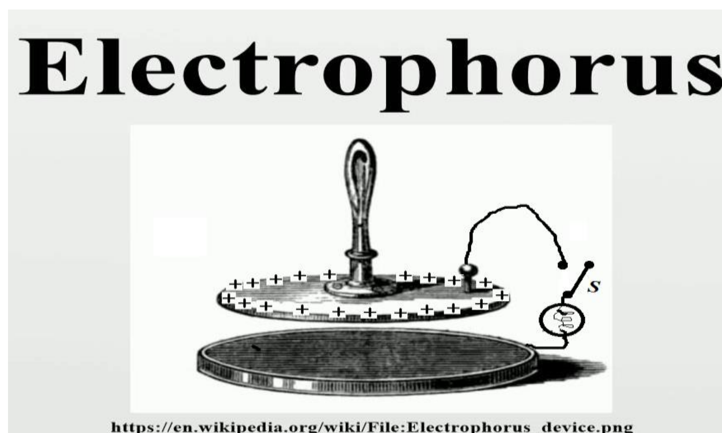
Figuur 35 Energiewinning uit zoutgradiënt. Pressure Retarded Osmosis.

Opdracht 31
In Noorwegen is recentelijk de enige osmose-centrale in de wereld gesloten. Voor een buitenstaander is het niet eenvoudig te achterhalen waarom dit is gebeurd. Voor een zoektocht naar de motieven zouden we eigenlijk moeten afreizen naar de plaats delict. Maar gericht zoeken wordt pas mogelijk als we van tevoren een idee hebben waar we naar moeten zoeken.

a. Leg uit welke uitgangspunten gehanteerd zouden **kunnen** zijn voor de beslissing om deze centrale te sluiten.
b. Zoek op internet of je Noren kunt vinden die iets willen weten over de uitgangspunten die ten grondslag hebben gelegen aan het besluit.

Capacitive mixing

In Italië is onder leiding van Doriano Brogioli een methode ontwikkeld om Blue Energy op te wekken die gebaseerd is op het laden/ontladen van een condensator.

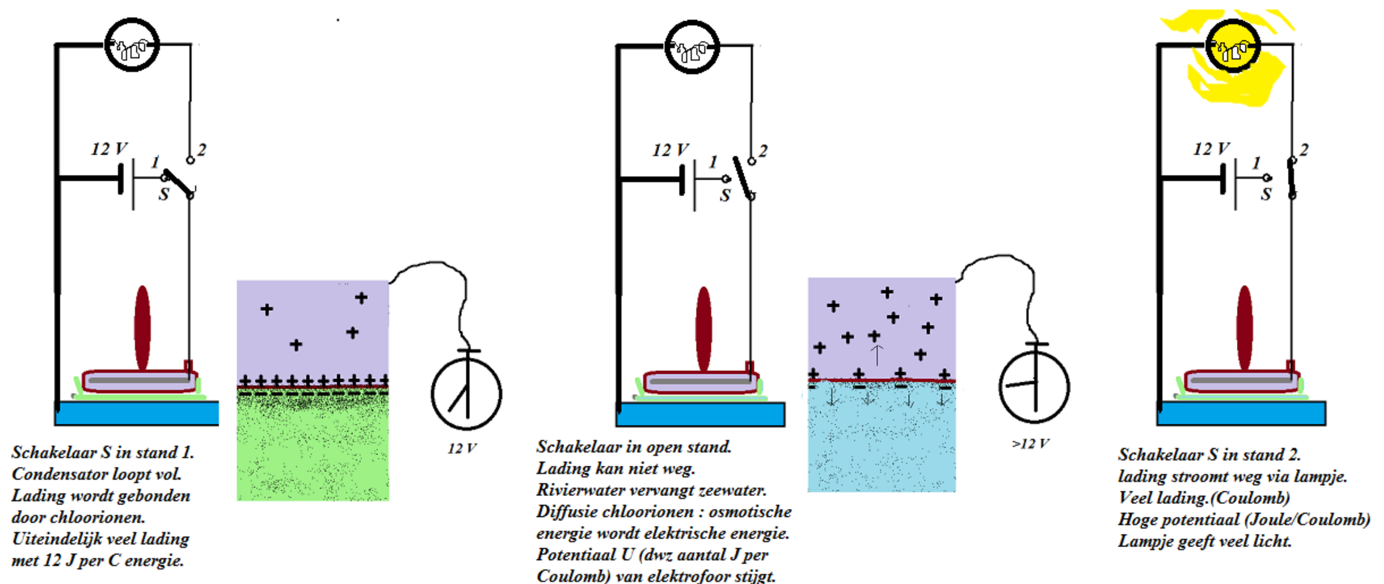


Figuur 36 Als de condensator naar boven wordt getrokken moet arbeid worden verricht. Niet alleen om de zwaarte-energie te leveren maar ook om de elektrische energie te leveren omdat de positieve ladingen worden weggetrokken van de aantrekkende negatieve influentielading op de bodem.

Bekijk figuur 37. Een elektrofoor is een condensator waar je lading op kunt verdichten (condenseren). Om die lading daarop te brengen kost energie want die ladingen stoten elkaar af en elke extra lading wordt sterker afgestoten. De energie komt weer vrij als je de schakelaar S sluit want dan stromen elektronen uit de bodem naar de elektrofoor. De energie komt vrij in het dunne gloeidraadje. Het merkwaardige is nu dat de vrijkomende stralingsenergie van het lampje groter is naarmate de elektrofoor verder weg is van de onderliggende bodemplaat! Hoe is dat mogelijk? Waar komt die extra energie vandaan?
Ga uit van bovenstaande situatie. Als je de elektrofoor wilt optillen is er spierkracht nodig maar die is groter dan de zwaartekracht!

Door de positieve lading op de elektrofoor is er influentie opgetreden. De ondergrond is lokaal negatief geworden. Trek je de elektrofoor omhoog dan is er behalve de zwaartekracht ook een elektrische kracht die je moet overwinnen.
Vechten tegen de zwaartekracht levert zwaarte-energie. (Arbeid tegen de zwaartekracht). Vechten tegen de elektrische kracht levert elektrische energie. (Arbeid tegen de elektrische aantrekking). Toename van elektrische energie betekent toename van de potentiaal U van de elektrofoor. De potentiaal is namelijk niets anders dan het aantal Joules per Coulomb lading van de positieve lading die op de elektrofoor zit. Een Volt wil zeggen: 1 Joule per Coulomb lading: 1V = 1 J/C. De hier getekende opstelling is natuurlijk wel een gedachten-experiment. Zou je op de getekende elektrofoor 1 Coulomb proberen te verzamelen dan zouden middels grote vonken die lading er weer even hard afspringen, hup, naar de bodemplaat. 1 Coulomb is namelijk zeer veel lading! Maar de komst van supercondensatoren maakt het mogelijk meer lading te verzamelen. Zo'n lampje zou dan wel eens echt kunnen gaan gloeien!
Hoe kun je die supercondensatoren nu inzetten om de osmotische energie te oogsten van zee- en rivierwater? Hier spelen de zoutionen weer een cruciale rol.

Het kost minder energie om lading op een plaatcondensator te verzamelen in zout water dan in zoet water omdat de zoutionen daarbij een handje helpen. Chique gezegd: De capaciteit C (in C/V) hangt af van het diëlektricum.
In Italië maakt men daarvan gebruik. Bekijk figuur 38.



Figuur 37 Elektrofoor laadt op in omgeving met zout water en ontlaadt in omgeving met zoet water. Het vervangen van zout door zoet water heeft twee functies: de zoutionen zorgen voor veel lading op de condensator en de diffusie zorgt voor extra energie van de lading.

In figuur 38 is het proces afgebeeld. We onderscheiden bij het proces drie fasen:

Fase I:
In de eerste fase bevindt een supercondensator van koolstof zich in zout water. Tussen water en condensator zit een isolerende laag. Met een schakelaar wordt de condensator verbonden met een accu van 12 V. De supercondensator wordt geladen. De chloorionen in het zoute water concentreren zich bij de isolerende laag. En de lading van de condensator zit ook vooral bij de grenslaag (puntje van zorg: de isolerende laag moet dun zijn want ionen in de vloeistof en elektronen in de condensator moeten elkaar wel kunnen voelen! Tegelijkertijd moet de isolator wel als zodanig blijven functioneren!) Als de condensator *'vol'* is (d.w.z. over de condensator staat nu ook 12 Volt) wordt de schakelaar open gezet. De lading kan geen kant meer op. (Mits die isolator zijn werk doet…!!!!)

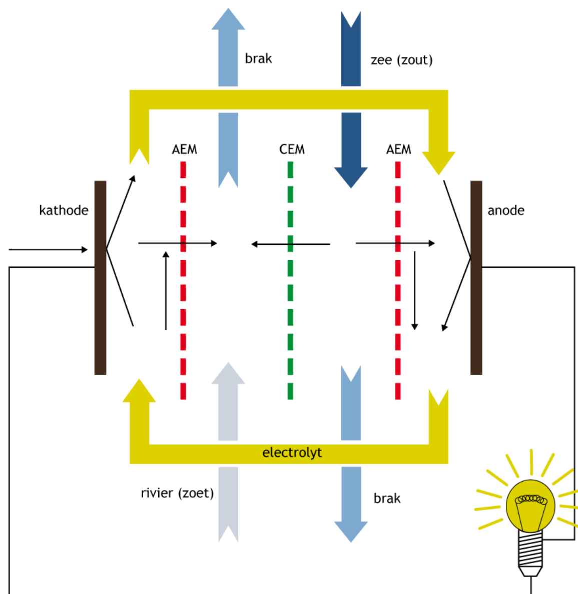
Fase II:
Het zoute water wordt vervangen door zoet water. Dit vermindert het aantal ionen rond de condensator. Diffusie doet zijn werk. Kwestie van statistiek. Maar dat betekent dat de lading op de condensator minder wordt gebonden. 'Osmotische energie' neemt af, elektrische energie neemt toe en dus ook de spanning over de condensator.

Fase III:
Een uitwendige weerstand (bijvoorbeeld een gloeidraad) wordt aangesloten door de schakelaar om te zetten. De lading stroomt van de condensator af. De opgeslagen energie komt vrij. En wel in de gloeidraad. Het zoete water wordt weer vervangen door het zoute water. Het proces kan weer van voren af aan beginnen.
Heeft dit proces nu energie geleverd? Brandt dit lampje niet gewoon omdat de batterij de benodigde energie heeft geleverd? Heeft de aanwezigheid van zoet en zout water energie geleverd? Het antwoord is ja. Om inzicht te krijgen dat hier netto meer energie is geleverd dient opdracht 35.

Opdracht 32
In plaats van een lampje wordt er nu een halflege accu aangesloten op de schakelaar in stand 2. In de accu zit 4 kWh. De accu op stand 1 bevat 7 kWh. We nemen aan dat er geen energie verloren gaat (wel wat optimistisch!).
Er zijn twee reservoirs: in de ene zit zout water en in de andere zit zoet water. De condensator wordt vervolgens opgeladen in het reservoir met het zoute water en ontladen in reservoir met het zoet water. De cyclus wordt steeds herhaald. De totale energie van de twee accu's blijkt na elke cyclus te zijn toegenomen.
a. Leg uit dat hier geen sprake is van een Perpetuum Mobilé.
b. Wanneer eindigt dat proces van toenemende elektrische energie?
In het eerste reservoir zit 393 liter zout water (30 g/l) en in het tweede reservoir zit 607 liter met zoet water (1 g/liter)
c. Hoeveel energie zullen beide accu's na afloop ten hoogste bevatten?
Een en ander is in een YouTube-filmpje te bewonderen: **(►URL5)** Bekijk het filmpje

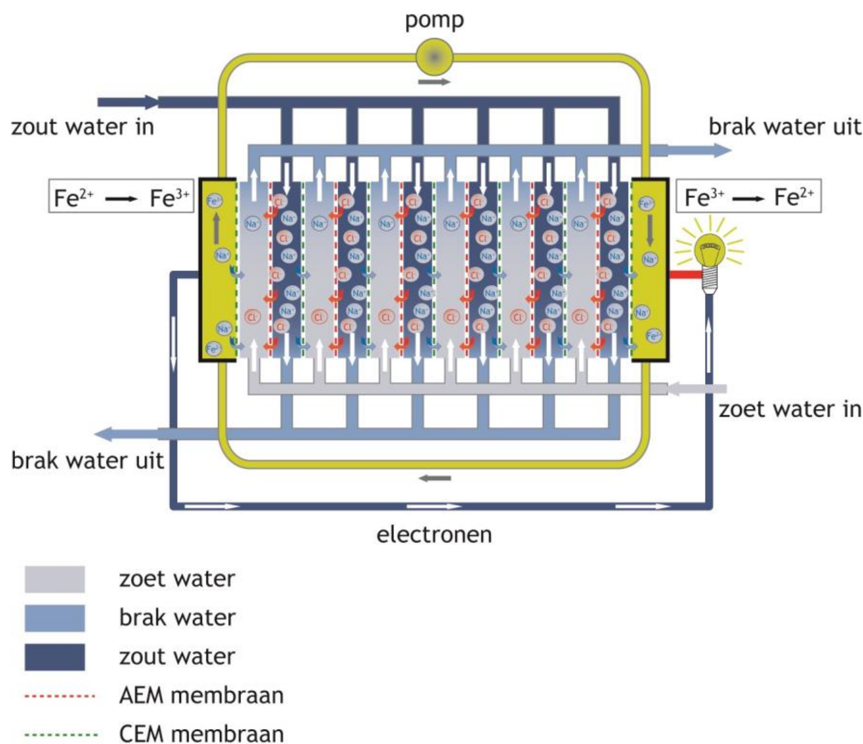
Reverse Electrodialysis (RED)

De hiervoor genoemde technieken gebruiken mechanische methoden om elektrische energie op te wekken. Het voordeel van Reverse Electrodialysis (RED) is dat de installatie geen bewegende onderdelen bevat voor de directe productie, hoewel er wel pompen nodig zijn voor de aanvoer van zoet en zout water en voor de elektrodespoeling. Op deze techniek zullen we verder ingaan.



Figuur 38 Een RED-installatie met een zoetwaterkamer en een zoutwaterkamer.

4.2 Directe elektriciteitsproductie met RED



Figuur 39 Reverse Electro Dialysis (RED) ofwel omgekeerde electrodialyse.

In figuur 39 Figuur 39staat een schematische tekening van de opstelling voor elektriciteitsopwekking met RED. De opstelling bestaat uit twee delen: de door membranen gescheiden compartimenten, waar het water doorheen stroomt (blauw in figuur 39) en de elektroden waar de elektriciteit wordt opgewekt (geel).

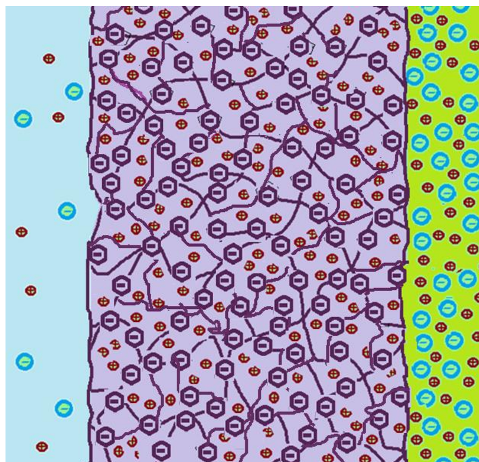
Door de compartimenten stroomt zeewater en rivierwater, van elkaar gescheiden door membranen. Het zeewater en rivierwater kunnen nu niet mengen, want de membranen laten geen water door. De in het zeewater opgeloste ionen kunnen wel door de membranen diffunderen. De membranen hebben speciale eigenschappen, waardoor de natriumionen en de chloride ionen in het zeewater allebei een andere kant op diffunderen.

In de tekening gaan de negatieve chloride-ionen naar links en de natriumionen naar rechts. Beide ionenstromen veroorzaken dus een (positieve) stroom naar rechts. Deze ionenstroom moet nog omgezet worden in een elektronenstroom, ofwel elektriciteit. Dit gebeurt aan de elektroden, door middel van redoxreacties, waarbij aan de ene elektrode (de anode, in de figuur links) een elektron vrijkomt ($Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^{-}$), dat vervolgens door een stroomdraad de andere elektrode (de kathode, in de figuur rechts) stroomt, waar het weer wordt gebruikt ($Fe^{3+} + e^{-} \rightarrow Fe^{2+}$).

We bekijken nu de twee onderdelen van de RED (de membraan-gescheiden compartimenten en de elektrodes) in meer detail.

Compartimenten en membranen

Het hart van de RED bestaat uit zoetwater- en zoutwatercompartimenten, die gescheiden worden door ***ionenwisselende membranen***. De RED-installatie heeft twee typen membranen, die beide geen water doorlaten: een ***anionwisselend membraan*** (anion exchange membrane, AEM) en een ***kationwisselend membraan*** (cation exchange membrane, CEM). De anionwisselende membranen kunnen alleen anionen – negatieve ionen, bijvoorbeeld chloride uit het zeewater – transporteren. De kationwisselende membranen kunnen alleen kationen – positieve ionen, bijvoorbeeld natrium uit het zeewater – transporteren. De installatie bevat afwisselend CEM’s en AEM’s, zie figuur 39.
Als we meer in detail kijken hoe die membranen zijn opgebouwd, blijken alle hier gebruikte ionenwisselende membranen te bestaan uit twee delen: een skelet en een ionenwisselende groep. Het ***skelet*** bestaat uit organische polymeren (macromoleculen) zoals polyetheen, polystyreen of PVC. Polyetheen is het goedkoopste plastic, er worden ook vuilniszakken van gemaakt. Het verschil tussen ***CEM*** en AEM membranen heeft te maken met de ***ionenwisselende groep***. Bij CEM is de ionenwisselende groep doorgaans het natriumzout $\sim SO_3^{-}Na^{+}$. Het teken ~ geeft de binding van de sulfonzuurrest met het vaste skelet aan. Het membraan bevat dus grote (negatieve) sulfonaationen en kleine (positieve) natriumionen. In figuur 40 is een CEM-membraan afgebeeld ingeklemd tussen een zoetwaterkamer aan de ene kant en een zoutwaterkamer aan de andere kant.



Figuur 40 Een cem-membraan ingeklemd tussen een zoetwaterkamer (links) en een zoutwaterkamer (rechts). $Na^{=}$ ionen kunnen makkelijk uitgewisseld worden.

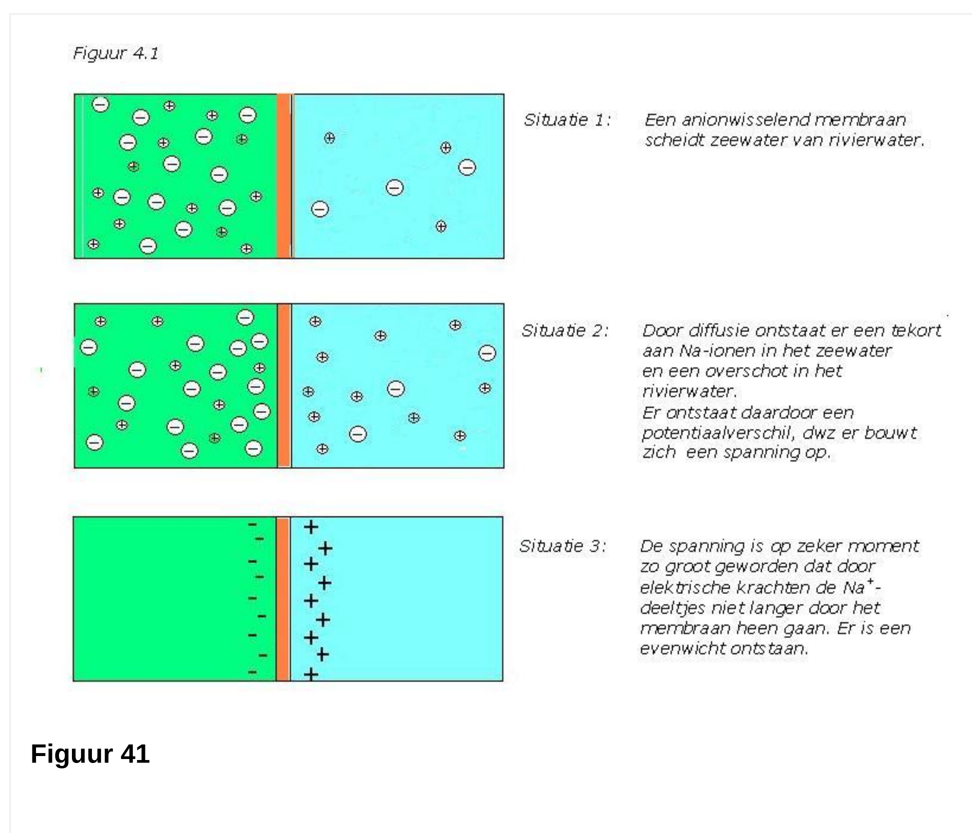
Daardoor is dit membraan uitsluitend doorlaatbaar voor positieve deeltjes: uitwisselingen vinden aan beide kanten plaats maar aan de rechterkant zijn die stromen groter dan aan de linkerkant Zo maakt het membraan een transport van natrium-ionen mogelijk door het membraan Het membraan laat uitsluitend Na^{+} ionen door en geen Cl^{-} ionen. De laatste kunnen het membraan niet binnendringen als gevolg van de afstoting tussen de vaste minladingen en de losse chloorionen.
Bij ***AEM*** is de actieve groep ook een zout, gebonden aan het skelet. Een eenvoudig zout is $\sim NH_3^{+}Cl^{-}$. Het AEM-membraan laat uitsluitend Cl^{-} ionen door. Na^{+} ionen kunnen het membraan niet binnendringen als gevolg van de afstoting tussen twee positieve ladingen. Er zijn ook AEM-membranen waarin de waterstofatomen vervangen zijn door methylgroepen. De formule van deze ionenwisselende groep is $\sim N(CH_3)_3^{+}Cl^{-}$.

De ruimtes tussen de membranen, de compartimenten, worden afwisselend doorspoeld met zeewater en met rivierwater, die van elkaar gescheiden blijven door de membranen die geen water doorlaten. De opgeloste zoutionen van het zeewater

kunnen wel mengen met de zoutionen van het rivierwater. Natriumionen in het zeewater kunnen alleen diffunderen door het CEM en bewegen in de tekening naar rechts en veroorzaken zo een positieve ionenstroom naar rechts. De chloride ionen passeren de AEM en vormen zo een negatieve ionenstroom naar links, die opgevat kan worden als een positieve stroom naar rechts.

4.2 Spanning

Waarom levert een RED-cel spanning? En hoe groot is die spanning? De spanning is het gevolg van de potentiaalverschillen die over de membranen ontstaan. Om te zien hoe groot het potentiaalverschil is over een membraan bekijken we in detail de situatie zoals die zal ontstaan als we zeewater scheiden van rivierwater door middel van een membraan dat alleen Na+-ionen doorlaat. Zie figuur 42.



Figuur 41

Door diffusie van de Na-ionen ontstaat er een spanning over het membraan.

Hoe groot is de spanning over een membraan?

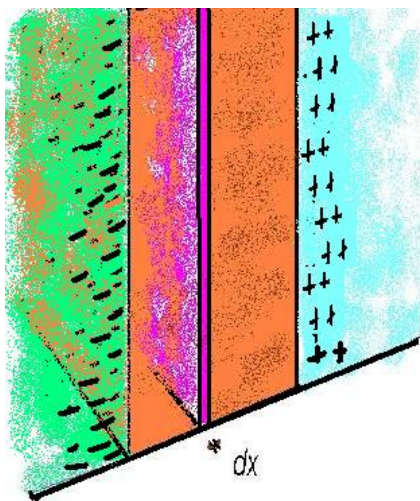
Om te zien hoe de spanning over een membraan afhangt van de zoutconcentraties aan weerszijden van het membraan, maken we gebruik van een model.

Het membraan stellen we ons voor als een ruimte waarin sprake is van diffusie van natrium-ionen onder invloed van een concentratiegradiënt (dc/dx). De diffusiestroom leidt er toe dat ladingen verschuiven. Hierdoor ontstaat een elektrisch veld binnen het membraan. Dat betekent dat een elektrische kracht ionen terugdrijft. Er is nu sprake van twee stromen die elkaar compenseren: er is de diffusiestroom ten gevolge van het verschil in concentratie en er is de stroom de andere kant op vanwege de elektrische

kracht die op de ionen wordt uitgeoefend. Als de opgebouwde spanning groot genoeg is, is er een stationaire toestand ontstaan waarbij beide stromen elkaar precies compenseren! Het was een jonge student, 25 jaar oud, die zich dit realiseerde. Albert Einstein schreef in 1905 een artikel over de Brownbeweging waarin hij kans zag een verband te leggen tussen de macroscopische wereld van diffusieverschijnselen en de microscopische wereld van de bewegende moleculen.

Wij zullen zijn redenering, in aangepaste vorm, volgen.

Bekijk figuur 42 waarin een kation-wisselend membraan is te zien dat zeewater (links) scheidt van rivierwater (rechts). Door diffusie gaan natriumionen naar het rivierwater maar daarbij ontstaat dus een spanning over het membraan.



Figuur 42 Een dunne lag (dikte dx) waarin transport van Na-ionen kan plaatsvinden. Door het kationwisselend membraan kunnen Na-ionen vrij bewegen waardoor het zeewater negatief geladen wordt en het rivierwater positief geladen wordt. Hierdoor ontstaat er een potentiaalverval over het membraan.

Over de entropische kracht op een ion.

Diffusie is natuurlijk een statistisch verschijnsel. Individuele deeltjes bewegen alle kanten op en veranderen voortdurend van richting ten gevolge van de vele botsingen: een individueel deeltje botst vele miljarden keren per seconde!

Wat Einstein zich realiseerde is dat er netto eigenlijk een kracht werkt in de richting van dalende concentratie: gemiddeld zal een individueel deeltje vaker botsen aan de linkerkant dan aan de rechterkant juist omdat er aan de linkerkant meer deeltjes zijn. Zo'n kracht wordt entropisch genoemd. Het is eigenlijk een direct gevolg van een statistisch verschijnsel dat zorgt voor een waarschijnlijker heelal, ofwel een universum met grotere entropie.

Einstein wist ook af te leiden hoe groot deze entropische kracht is. Hij gebruikte daarvoor de ontdekking van de eerste Nobelprijswinnaar voor scheikunde, de Nederlander Johannes van het Hoff. Die had namelijk aangetoond dat voor de deeltjes in de oplossing de algemene gaswet geldt.

$$pV = nRT$$

En omdat n/V het aantal mol per m^3 is, geldt dus ook:

$$p = cRT$$

Hierin is c de concentratie van de deeltjes in mol/m^3. Het drukverschil over de laag wordt dan

$$dp = dc * RT$$

De totale entropische kracht op de hele laag met deeltjes is dan

$$F_{laag} = A * dp = A * -dc * RT$$

Het aantal deeltjes in de laag bedraagt

$$N_{laag} = c * N_A * A * dx$$

Dus voor de entropische kracht op een deeltje geldt:

$$F_{deeltje} = \frac{F_{laag}}{N_{laag}} = \frac{A * dc * RT}{c * N_A * A * dx}$$

Dit kan worden vereenvoudigd. De grootheid R/N_A bijvoorbeeld is de constante van Boltzmann (k). Het oppervlak A kan worden weggestreept. Dus geldt voor de entropische kracht:

$$F_{entropisch} = -\frac{1}{c}\frac{dc}{dx} * kT$$

Hierin is

dc	= concentratieverschil ionen over de laag (mol/m^3)
dx	= dikte van de laag (m)
k	= constante van Boltzmann = $2,3*10^{-23}$ (J/K)
T	= absolute temperatuur (K)

Over de elektrische kracht op een ion

Voor de elektrische kracht op een ion geldt:

$$F_{el,ion} = qE = 1 * -\frac{dU}{dx}$$

Hierin is gebruikt dat de veldsterkte E (N/C) in waarde gelijk is aan het potentiaalverval per meter (J/Cm). Dus voor de elektrische kracht geldt:

$$F_{el,ion} = -ze * \frac{dU}{dx}$$

Hierin is

dU = potentiaalverschil over de laag (volt)
dx = dikte van de laag (m)
z = valentie
e = elementair-lading = $1,6*10^{-19}$ (Coulomb).

Over het evenwicht

Als door diffusie de spanning over de laag zo groot is geworden dat de diffusie gecompenseerd wordt door het ionentransport, ontstaat er een dynamisch evenwicht. De spanning zal niet meer toenemen en heeft zijn maximale waarde bereikt.
Dan geldt:

$$F_{entropisch} = F_{elektrisch}$$

En dus

$$-\frac{1}{c}\frac{dc}{dx} * kT = -ze * \frac{dU}{dx}$$

Voor het potentiaalverschil over de laag zal dan gelden:

$$dU = \frac{kT}{ze} * \frac{1}{c} dc$$

Integreren (optellen van de spanningsvalletjes over de verschillende laagjes) levert op:

$$\int dU = \frac{kT}{ze} * \int \frac{1}{c} dc$$

En dus

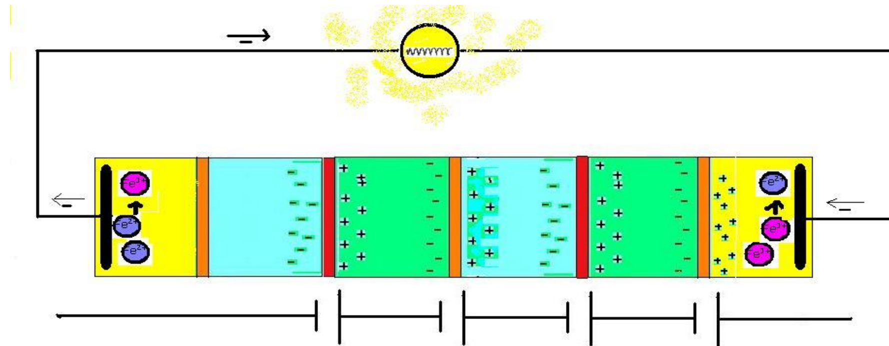
$$\Delta U = \frac{kT}{ze} * \{\ln(C_{hoog}) - \ln(C_{laag})\}$$

De constanten k en e kunnen nog worden vervangen door hun macroscopische tegenhangers R (universele gasconstante) en F (de constante van Faraday).
Dus R = $k*N_A$ en F = $e*N_A$. Bovendien kan verschil van twee logaritmes vervangen worden door de logaritme van een quotient.
De spanning over een membraan kan dan worden berekend met de formule van Nernst::

$$U_{membraan} = \frac{RT}{zF} * \left\{ \ln\left(\frac{C_{hoog}}{C_{laag}}\right) \right\}$$

Waarin	U	= spanning over het membraan (Volt)
	F	= constante van Faraday = 96450 (C/mol)
	z	= valentie
	R	= universele gasconstante = 8,3145 (J/mol,K)
	T	= absolute temperatuur (K)
	c_{hoog}	= concentratie ionen zeewater (mol/m^3 of mol/liter)
	c_{laag}	= concentratie ionen rivierwater (mol/m^3)

Door diffusie van de Na-ionen ontstaat er een spanning over het membraan Door compartimenten afwisselend met zeewater en rivierwater af te wisselen ontstaat er een serieschakeling van spanningen in gelijke richting. Zie figuur 44.



Figuur 43 Membranen die aan zeewater grenzen zorgen voor een bijdrage aan de spanning van de batterij door diffusie van ionen vanuit het zeewater. Links komt een elektron vrij door de redoxreactie $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$. Het omgekeerde koppel zorgt voor het vrijkomen van een elektron aan de andere kant.

In het figuur is te zien waarom er een stroom gaat lopen als de elektroden met een lamp worden verbonden. Door diffusie ontstaan spanningsverschillen. Die zorgen ervoor dat er een ionenstroom op gang komt door de membranen. Het zeewater wordt minder zout, het rivierwater wordt zouter.
Aan de uiteinden vinden redoxreacties plaats waarbij aan de ene elektrode elektronen vrijkomen door middel van de redoxreactie $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$
En bij de andere elektrode vindt de omgekeerde reactie plaats.
Om de batterij in bedrijf te houden, moet het brakke water worden afgevoerd en vers zout en zoet water worden aangevoerd. De elektrolyt met Fe^{2+} en Fe^{3+} - ionen moet worden rondgepompt.

Opdracht 33
Bereken de spanning die geleverd wordt door een RED centrale met 52 anion-wisselende membranen en 53 kationwisselend membranen. Zeewater (30 g/l) en rivierwater (1 g/l). Temperatuur 15 ^{0}C.

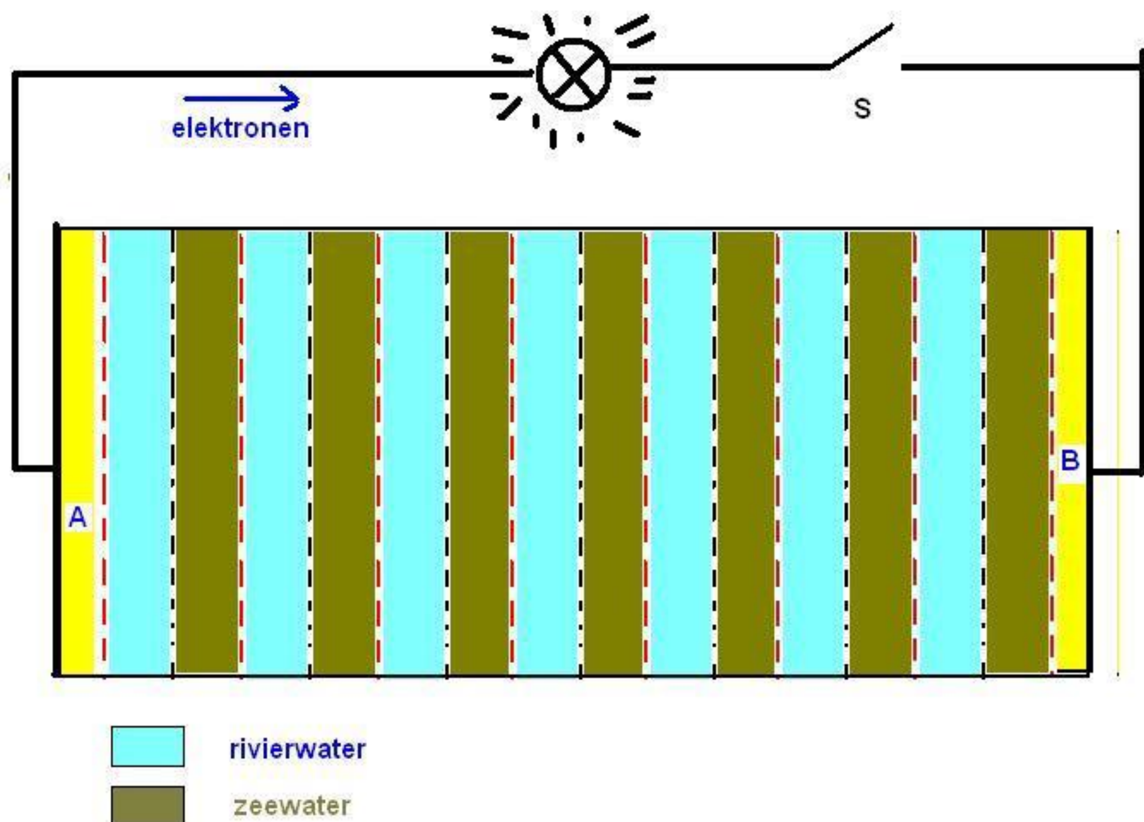
Opdracht 34
Het oppervlak van de membranen zit niet in de formule van Nernst. Maakt het bij de bouw van een RED-centrale niet uit wat het oppervlak van de membranen is? Leg uit.-

5 Hoeveel vermogen kunnen we maken?

In hoofdstuk 3 bleek dat bij menging van rivierwater en zeewater energie vrijkomt. In hoofdstuk 4 is uitgelegd hoe deze mengenergie in een RED-installatie wordt omgezet in een elektrische potentiaal. Maar het gaat ons niet om spanning. Dat is het middel. De vraag is hoe veel de centrale kan bijdragen aan de energievoorziening. Wat je wilt weten is: hoeveel energie kan de centrale in een bepaalde tijd leveren?

- In dit hoofdstuk leer je hoe je kunt uitrekenen hoeveel vermogen je uit een RED kunt halen.

5.1 Elektrisch circuit



Figuur 44 Een RED-installatie in bedrijf

In de RED van figuur 45 is een lampje aangesloten op de RED. Wanneer dit lampje vervangen wordt door een voltmeter, kan er geen stroom lopen, De weerstand van zo'n voltmeter is immers zeer groot. Een stack waarop geen apparaat is aangesloten noemen we een onbelaste stack. Door veel membranen achter elkaar in een stack te schakelen, kunnen de gewenste voltages gemaakt worden (opdracht 40). Met een stapel van bijvoorbeeld 13 membranen is het stack voltage ongeveer 1 volt, zolang de stack onbelast is. Met *N* membranen geldt voor de spanning van de onbelaste stack:

$$U_{bron} = (N - 1) * U_{membraan}$$

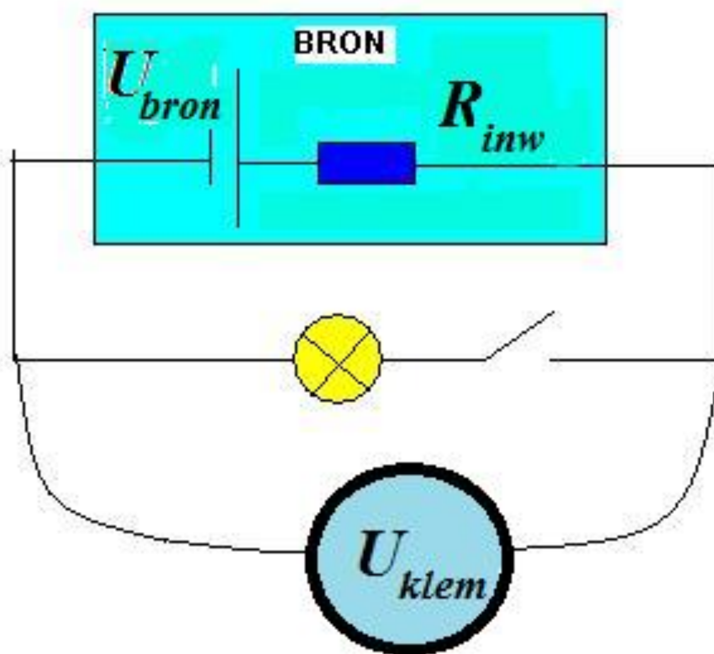
waarin:

U_{bron}	= bronspanning = open circuit voltage in volt (V)
N	= aantal membranen
$U_{membraan}$	= potentiaalverschil over een membraan in volt (V).

Als we een apparaat, bijvoorbeeld een lampje, aansluiten op de RED-stack gaat er een stroom lopen. Hierdoor is het stack voltage niet langer gelijk aan de OCV. In feite gaan er gelijktijdig twee stromen lopen:

- ***een inwendig ionentransport*** van zout naar zoet water: negatief geladen chloride-ionen stromen richting de anode en positief geladen natriumionen stromen richting de kathode. Er stroomt dus een positieve lading van anode naar kathode. Deze ladingsstroom is even groot als (‘equivalent aan’) de elektrische stroom. Tijdens het ladingstransport verliezen de ionen door wrijving een deel van hun energie. Deze wrijving kunnen we beschouwen als inwendige weerstand.
- ***een uitwendige elektrische stroom*** van elektronen van -pool naar +pool. De elektronen stromen door het aangesloten apparaat dat een bepaalde uitwendige weerstand heeft en staan daarbij elektrische energie af aan het apparaat. Een lampje bijvoorbeeld gaat branden, waarbij elektrische energie wordt omgezet in licht en warmte.

We kunnen het bovenstaande weergeven in de stroomkring van figuur 46. Hierin is de stack weergegeven met daarin een spanningsbron en een interne stackweerstand R_i (*i* van inwendig). Het lampje is aangesloten op de polen van de stack en heeft een weerstand R_u (*u* van uitwendig). De voltmeter meet de bronspanning als er geen stroom loopt en meet de klemspanning als er wel stroom loopt. De ampèremeter (A) meet de stroomsterkte.



Figuur 45 Schematekening van stack en aangesloten.

Als de schakelaar open staat wordt er geen stroom geleverd en dus ook geen vermogen afgenomen.
Als de schakelaar wordt gesloten gaat er stroom lopen en wordt er vermogen geleverd. Voor een deel is dit nuttig. Voor een ander deel is dit vermogensverlies omdat de bron zelf weerstand heeft. Er ontstaat nu warmteverlies in de bron.
De volgende formules gelden:

$$U_{klem} = U_{bron} - U_{verlies}$$

$$U_{verlies} = IR_{inw}$$

$$P_{nuttig} = U_{klem} * I$$

$$P_{totaal} = U_{bron} * I$$

Opdracht 35
Het nuttige vermogen van de stroomkring hangt af van de keuze van de uitwendige weerstand. Kiezen we de uitwendige weerstand klein dan komt over de inwendige weerstand veel spanning te staan en over de uitwendige weerstand weinig. Het nuttige vermogen zal dan ook klein zijn. Kiezen we uitwendige weerstand juist heel groot dan gaat er vrijwel geen stroom lopen. Ook dan is het nuttig vermogen klein. De vraag rijst: hoe groot moet de uitwendige weerstand zijn om het rendement zo groot mogelijk te maken?
Ga uit van een bron met een bronspanning van U_{bron} en een inwendige weerstand R_i. Noem de uitwendige weerstand x.

a. Schrijf het totale vermogen als functie van x.
b. Schrijf het nuttige vermogen als functie van x.
c. Schrijf het rendement als functie van x.
d. Differentieer de functie van het nuttige vermogen naar x en leid daaruit af hoe groot x in vergelijking met R_i moet zijn om een maximaal nuttig vermogen te krijgen.

Het geleverde vermogen van een RED-installatie is dus afhankelijk van drie variabelen:

- De bronspanning (ook wel OCV (= open circuit voltage) genoemd.
- de uitwendige weerstand R_u,
- de inwendige weerstand R_i.

Als we het elektrisch vermogen zo groot mogelijk willen krijgen, zullen we deze drie factoren moeten bekijken. De eerste grootheid heb je al onderzocht in hoofdstuk 4. De tweede grootheid kwam je tegen in de vragen 34 en 35. Rest nog de inwendige weerstand.

5.2 Inwendige weerstand van RED

Voordat we de invloed van de inwendige weerstand op het vermogen van de RED kunnen bespreken, bekijken we eerst wat bedoeld wordt met ***elektrische weerstand.*** De elektrische weerstand is de eigenschap van materialen die de doorgang van elektrische stroom bemoeilijkt, er is energie voor nodig. Het eenvoudigste 'apparaat' om die weerstand te bestuderen, is een metalen draad. De elektrische weerstand van een metalen draad wordt gegeven door:

$$R = \rho * \frac{l}{A}$$

Waarin:

R	= weerstand in ohm (Ω)
ρ	= soortelijke weerstand in ohm-meter ($\Omega m^2\ m^{-1} = \Omega m$)
l	= lengte in meter (m)
A	= oppervlakte in vierkante meter (m^2).

Deze wet (***de wet van Pouillet***) stelt dat het omgekeerde van de soortelijke weerstand ***de (soortelijke) geleidbaarheid*** (σ) is of ***conductiviteit***:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

De soortelijke geleidbaarheid wordt gemeten in Siemens per m ((S/m).
Net als bij de het transport van elektronen door een draad of apparaat is voor het ladingstransport in de stack ook energie nodig: de ionenstroom ondervindt ook weerstand, er is energie voor nodig. Deze inwendige weerstand (R_i) is net als de 'gewone' elektrische weerstand afhankelijk van de lengte, de doorsnee (de oppervlakte) en de soortelijke weerstand of geleidbaarheid van de stoffen.

De weerstand van de membranen is bekend bij de fabrikant, die spreekt van de zogenaamde oppervlakteweerstand. Een typische waarde is 3 Ω cm^2 ofwel $3 \cdot 10^{-4}\ \Omega m^2$. Uit de wet van Pouillet volgt dat dit de soortelijke weerstand is maal de lengte, dus $\rho \cdot l$. De lengte is in dit geval de dikte van het membraan, want de ionen gaan door het membraan van de ene kant van het membraan naar de andere kant. De weerstand van een membraan met een oppervlakte van 1 m^2 is dus $3 \cdot 10^{-4}\ \Omega$.
Ook de weerstand van rivierwater en zeewater volgt uit de wet van Pouillet. De geleidbaarheid van zoutoplossingen zoals rivierwater en zeewater wordt gemeten met een geleidbaarheidsmeter of saliniteitsmeter. Hoe meer zout er in het water is opgelost, hoe beter de geleiding is. Voor zeewater van 30 g NaCl L^{-1} is bij een temperatuur T = 298 K de geleidbaarheid ongeveer 50 mS cm^{-1} = 5 S m^{-1}, voor rivierwater van 1 g NaCl L^{-1} is deze 2 mS cm^{-1} = 0,2 S m^{-1}. Als de afstand tussen de membranen bekend is, is de weerstand van ieder laagje zeewater en rivierwater te berekenen.

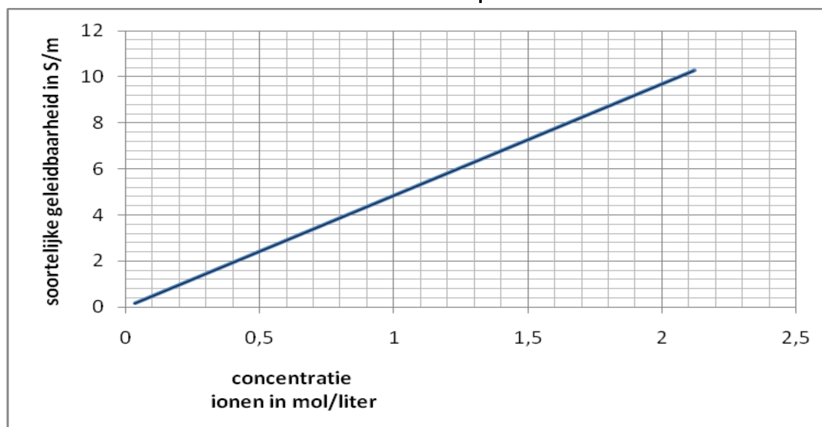
Opdracht 36

Een stack bestaat uit 40 compartimenten (20 zoet, 20 zout) afgewisseld met kation- en anionwisselende membranen. De afstand tussen de membranen bedraagt 0,80 mm. De membranen zelf hebben een afmeting van 30 cm x 30 cm. De zoet watercompartimenten hebben een zoutgehalte van 1,5 g/liter. De zoutwatercompartimenten hebben een zoutgehalte van 20 g/liter.

a. Bereken de weerstand van een zoetwatercompartiment.
b. Bereken de weerstand van een zoutwatercompartiment.
c. Bereken de weerstand van een membraan.
d. Bereken de weerstand van de stack.
e. Wat is de belangrijkste bijdrage aan de weerstand van een stack?

Opdracht 37

Een stack bevat 15 zoet watercompartimenten die 2,0 gram zout per liter water bevatten en 15 zout watercompartimenten die 40 gram per liter bevatten. De kamer zijn 2,0 mm breed. De effectieve oppervlakte van de membranen is 0,60 m^2. Het geleidingsvermogen van water is hieronder in een grafiek weergegeven als functie van de concentratie. Temperatuur is 15 ^{0}C.



a. Bereken de bronspanning van de stack.
b. Bepaal de evenredigheidsconstante in de grafiek hierboven.
c. Bereken de weerstand van de stack.
d. Bereken de stroomsterkte als er een uitwendige weerstand wordt aangebracht die even groot is als de inwendige weerstand.
e. Bereken welk nuttig vermogen dan wordt geleverd.

Als de centrale een tijdje heeft gewerkt, zijn de concentraties van het zoute water en het zoete water veranderd. Als gevolg hiervan veranderen allerlei grootheden.

f. Leg uit hoe de volgende grootheden zullen veranderen en waarom: bronspanning/ inwendige weerstand/ stroomsterkte/ totaal vermogen/ verliesvermogen.
g. Als de stroomsterkte op zeker moment 5,0 A bedraagt, hoe groot is dan de ionenflux door het membraan? (de ionenflux is het aantal ionen dat per seconde het midden van een membraan passeert). En hoe lang zou het dan duren voordat 0,1 gram zout van het zoute naar het zoete water is gegaan?

Numerieke analyse

Met behulp van een dynamisch model kan worden voorspeld hoe de grootheden onder f in de loop van de tijd veranderen als er geen waterverversing plaats vindt. In een kleine periode dt mag de stroomsterkte en dus ook de ionstroom door een membraan constant worden verondersteld. Ga uit van de volgende grootheden

cnaz	concentratie natriumionen in zeewater.
cnar	concentratie natriumionen in rivierwater.
V	volume van een compartiment
I:	stroomsterkte
dNamol	aantal mol natriumionen dat in dt door membraan gaat
dt:	grootte van de tijdstap

cnaz en cnar hebben een bepaalde waarde. In de volgende tijdstap wordt cnaz iets kleiner en cnar wordt iets groter. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat er een aantal mol Na-ionen de oversteek maakt. Dit aantal is te berekenen mbv de stroomsterkte aangezien de Na-ionen het ladingstransport door de cem-membranen verzorgen. Dus

dNamol:= aantal elektronen per seconde*dt

aantal elektronen per seconde = stroomsterkte /lading van een elektron
met e = de elementaire lading: e = 1,6 * 10^{-19} C

Verder geldt:

$$cNaz = cNaz - \frac{dNamol}{Volcom}$$

$$cNar = cNar + \frac{dNamol}{Volcom}$$

Opdracht 38

a. Maak met deze relaties een model waarmee je de zoutconcentratie kunt volgen in de loop van de tijd zowel in de zeekamers als in de rivierkamers.
b. Laat het model draaien op Excel of bij Coach. Gebruik in dat laatste geval de niet-grafische modelomgeving.
c. Onderzoek bij welke belasting de centrale optimaal draait.

6. Onderzoek, ontwikkeling en ontwerp is teamwerk.

Je weet nu wat Blue Energy inhoudt en welke techniek hierachter zit. Om Blue Energy daadwerkelijk te kunnen toepassen zijn er nog verschillende stappen te ondernemen en onduidelijkheden die overbrugd moeten worden. Er moet er dus onderzoek gedaan worden om antwoord te krijgen op onderzoeksvragen.
Jij gaat je nu verdiepen in een van de volgende vier beroepen:

- De ***ingenieur*** heeft kennis over de technische aspecten van de centrale. De ingenieur is in staat om met behulp van gegevens over watertoevoer, zoutconcentraties en temperatuur te bepalen hoeveel huishoudens een bepaalde centrale van elektrische stroom kan voorzien. Deze specialisatie sluit vooral aan bij het vakgebied ***natuurkunde***.
- De ***planoloog*** heeft kennis over de fysisch-geografische factoren die een rol spelen bij de locatiebepaling van een Blue Energy centrale. De planoloog kan een gegeven locatie beoordelen op geschiktheid voor zo een centrale. Verder is de planoloog degene die ideeën moet inbrengen over hoe Blue Energy kan worden ingepast in de omgeving. Deze specialisatie sluit vooral aan bij het vakgebied ***aardrijkskunde***.
- De ***milieudeskundige*** is in staat om in te schatten welke effecten een Blue-Energy-centrale heeft op het milieu van de gekozen locatie. De milieudeskundige moet in staat zijn onderzoek te doen naar ecosystemen van een estuarium, dit is een brak water gebied dat wordt aangetroffen bij de monding van rivieren. De milieudeskundige is er voor verantwoordelijk dat de centrale een bijdrage vormt aan de biodiversiteit van de regio. Deze specialisatie sluit vooral aan bij de vakgebieden ***scheikunde en biologie***.
- De ***beleidsadviseur*** moet in staat zijn om snel een globaal inzicht te krijgen in de mogelijke bijdragen van de expertises van de ingenieur, de planoloog en de milieudeskundige. De adviseur is verantwoordelijk voor de communicatie binnen het team. De adviseur moet een politieke besluitvormingsprocedure ontwerpen die bijdraagt aan draagvlak onder de bevolking voor de bouw van de centrale. De adviseur heeft de eindredactie bij de opstelling van het advies aan de politiek. De beleidsadviseur is geen specialist maar een generalist. Hij is van alle markten thuis.

Om met een goed onderbouwd advies te komen over de haalbaarheid van een Blue Energy centrale, moeten jullie de kennis van deze vier verschillende vakgebieden integreren in één advies. Dit proces verloopt in een viertal fasen.

FASE 1 inventarisatie

Iedere specialist krijgt voor zichzelf de achtergrondinformatie behorend bij zijn specialisme om kort door te lezen. Leef je goed in je specialisme. Welke aspecten zijn met name relevant voor jouw expertise?

Ingenieur:

Je gaat je voorbereiden door het antwoord te zoeken op de vraag: hoeveel huishoudens die per dag elk ongeveer 10 kWh aan energie nodig hebben, kunnen van energie voorzien worden met Blue Energy en hoe moet een dergelijke centrale er uit gaan zien? Voor het eerste gezamenlijk overleg met de andere experts moet de ingenieur informatie kunnen overleggen waaruit blijkt wat het verband is tussen het bruikbare debiet (de beschikbare hoeveelheid zoet water die per seconde wordt aangevoerd) en de energiebehoefte (het aantal huishoudens dat van energie kan worden voorzien met behulp van Blue-Energy). Het gebruikte zoet water wordt zouter. Dit brakke water wordt gebruikt voor de aanleg van een estuarium en het is dus belangrijk om te weten wat het zoutgehalte is van dit water. Het water dat van zee komt wordt weer teruggepompt naar zee.

Planoloog:

Voor de planoloog is de belangrijkste vraag: welke locaties voldoen aan de eis dat daar grote hoeveelheden zoet water en zout water bijeen komen. Wat zijn de karakteristieken van deze regio's? Hoe groot is de hoeveelheid zoet water die per seconde wordt aangevoerd en hoeveel % is daarvan bruikbaar? Hoeveel potentiele gebruikers (huishoudens) kent de locatie? De planoloog moet voor de eerste bijeenkomst een lijst van tenminste 4 potentiële locaties van de Blue-energy-centrale opstellen. Elke locatie is voorzien van informatie over aanvoer van zoet water en aantallen betrokken huishoudens. Tevens is van elke locatie een kaart en satellietbeeld aanwezig waarop aantekeningen kunnen worden gemaakt.
De planoloog krijgt tijdens de inventarisatiefase bezoek van de beleidsadviseur die vooral is geïnteresseerd in de vraag welke gemeentes betrokken zijn bij het onderzoek. De planoloog krijgt ook bezoek van de milieudeskundige die vooral is geïnteresseerd in de vraag welke natuurgebieden in en rondom de gekozen locaties liggen en om na te gaan of er bij de gekozen locaties ruimte is voor een estuarium.

Milieudeskundige:

Voor de milieudeskundige is de belangrijkste vraag: wat zijn de kenmerken van een ecologisch systeem van waterrijke gebieden met brak water? Wat is het zoutgehalte van bestaande estuaria of varieert dat? De milieudeskundige neemt na bestudering van de kenmerken van bestaande estuaria contact op met de planoloog om te weten te komen welke locaties

in aanmerking komen. De milieudeskundige bestudeert de locaties op geschiktheid vanuit het oogpunt van biodiversiteit. Hij maakt een overzicht met locaties en de mate van geschiktheid (ongeschikt/geschikt/zeer geschikt) met een korte beschrijving.

Beleidsadviseur:

De beleidsadviseur stelt een plan op hoe bewoners/provincies/gemeentes moeten worden betrokken bij de besluitvorming rond de bouw van een centrale. Daarna gaat de adviseur langs bij de planoloog om te informeren naar de vorderingen. Welke locaties heeft de planoloog in gedachten? Welke gemeentes zijn betrokken bij de aanleg van de centrale in de genoemde locaties? Met deze informatie

Afsluiting van de inventarisatiefase

Vervolgens komen de vier experts bij elkaar om gezamenlijk de kaart van Nederland te bekijken en een lijst van mogelijke locaties op te stellen. De lijst bevat drie locaties die in aanmerking komen voor de bouw van een grote centrale.

FASE 2 onderzoek

De experts gaan nu voor de drie gekozen locaties weer onderzoek doen. Zij maken per locatie een *SWOT*-analyse, dit is een tabel met sterke kanten en zwakke kanten enerzijds en kansen en bedreigingen anderzijds voor de gekozen locatie. (*Strenghts and Weaknesses en Opportunities and Threats)*. Sorry voor het engels maar zo weet je wel wat bedoeld wordt met een SWOT-analyse! De tabel ziet er als volgt uit:

Strengths	Weaknesses
- - -	- - -
Opportunities	Threats
- - -	- - -

Iedereen vult de tabel in waarbij hij/zij alleen let op zijn eigen expertise. De ingenieur heeft vooral kennis van factoren binnen de technologie zelf, de milieudeskundige heeft kennis van het specifieke milieu, de planoloog kent de wereld van de toekomstige gebruiker van de elektrische energie. De beleidsadviseur maakt geen SWOT-analyse maar buigt zich over de vraag hoe de procedure er uit komt te zien.

FASE 3 Keuze

Vervolgens komt de experts bij elkaar. Op basis van de voorliggende SWOT-analyses maken de experts een keuze voor een van de drie locaties. De definitieve SWOT-analyse voor de gekozen locatie wordt opgesteld aan de hand van de gevoerde discussie. De beleidsadviseur heeft de eindredactie bij het op te stellen adviesrapport ten behoeve van publiek en politiek. De beleidsadviseur ziet er op toe dat de bijdragen van de andere drie experts in overzichtelijke bijlages worden toegevoegd. De beleidsadviseur doet ook een voorstel voor de procedure.

FASE 4 Presentatie

De vier experts presenteren het adviesrapport. De beleidsadviseur heeft daarbij de leiding. De overige experts geven toelichting waar gewenst.

Bijlage voor de ingenieur

De ingenieur moet kunnen bepalen hoe de centrale er uit komt te zien als bekend is hoeveel huishoudens met de centrale van elektrische energie moeten worden voorzien. Hiervoor is een excelsheet aangemaakt. Een aantal stappen moet worden gezet waarbij grootheden moeten worden gekozen (oranje balken) of gegevens moeten worden ingevoerd (groene balken).

De spanning (Uklem) die de gebruikers uit het stopcontact halen wordt ook gekozen. We gaan uit van 230 Volt maar je kunt ook een andere spanning kiezen. Bijvoorbeeld stopcontacten waar een laagspanning van 24 volt op staat. Bij gelijkblijvend vermogen wordt de stroom dan wel groter.

Stap 1: Kies het aantal huishoudens (Nh).

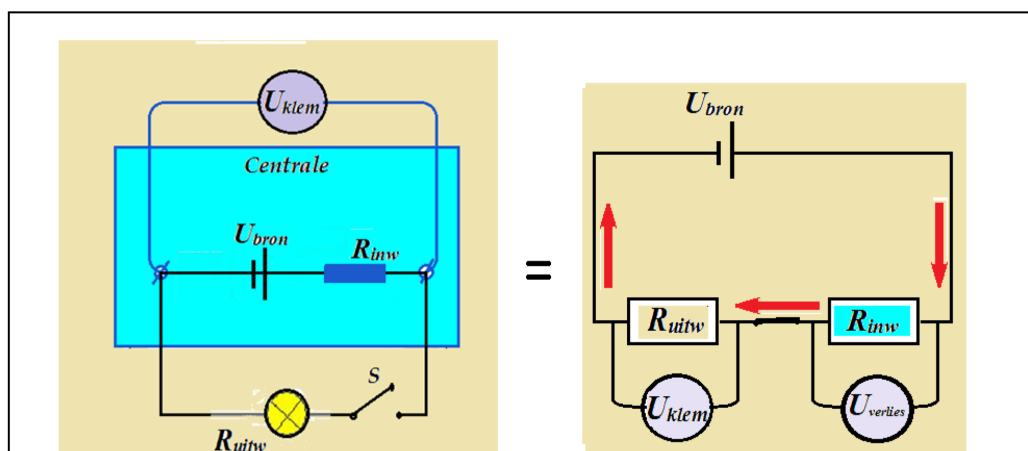
Het is handig om eerst eens naar een huishouden te kijken en om te beginnen met Nh :=1

Stap 2: Kies het gemiddeld vermogen dat een huishouden verbruikt.

Gemiddeld heeft een huishouden 10 kWh per dag nodig. Dat zou bijvoorbeeld kunnen zijn 1 kW vermogen gedurende 10 uur. Wij gaan uit van 0,417 kW gedurende 24 uur. De centrale kan dan 24 uur blijven draaien op hetzelfde vermogen. Voor de berekeningen is dat wel zo prettig. Vermoedelijk zal een of andere vorm van energie-opslag dan wel noodzakelijk zijn want ’s nachts zal het verbruik wel een stuk lager liggen dan overdag. Dus het gemiddeld vermogen per huishouden bedraagt Pm:= 417 Watt. Als je dat invult in de excelsheet wordt het totale gewenste vermogen meteen uitgerekend. Pnuttig := Pm *Nh

Stap 3: Bereken de stroomsterkte I, de uitwendige weerstand R_u

Als klemspanning en nuttig vermogen bekend zijn, is de stroomsterkte ook bekend. Kijk eens naar onderstaand plaatje.



Dat is een stroomschema van de centrale en de gebruikers.

De gebruikers van elektrische energie zijn in de tekeningen weergegeven als de uitwendige weerstand: Ru. Door de keuze van U_{klem} en P_{nuttig} liggen de stroomsterkte I en de uitwendige weerstand vast. De gebruikers verbruiken een elektrisch vermogen P_{nuttig}:=U_{klem} * I. Dus de stroomsterkte I kan worden berekend met

$$I = \frac{P_{nuttig}}{U_{klem}}$$

De uitwendige weerstand is de weerstand van de huishoudens. Er geldt

$$R_u = \frac{U_{klem}}{I}$$

Stap 4: Bereken de weerstand van de centrale zelf en de bronspanning.

De uitwendige weerstand wordt bepaald door de gebruikers en de spanning die de centrale levert aan de gebruikers zijn gekozen. Maar de centrale moet meer spanning en vermogen leveren dan die voor de gebruikers. De centrale heeft zelf een inwendige weerstand (R_{inw}) die vooral zit in het feit dat zoet water elektriciteit slecht geleidt. Als R_{inw} veel groter is dan R_u gaat het grootste deel van de spanning en dus ook van het vermogen naar de centrale zelf. Die wordt daardoor warm. P_{nuttig} is dan klein. Het rendement is dan laag. Als je R_u groter maakt wordt het rendement beter maar de stroomsterkte kleiner. Dan daalt het vermogen dat de gebruikers krijgen ook. Bewezen kan worden dat het afgegeven vermogen P_{nuttig} maximaal is als beide weerstanden aan elkaar gelijk zijn. We kiezen er dus voor om de centrale zo te bouwen dat de weerstand ervan gelijk is aan R_u. De beide voltmeters in de rechtertekening geven dus hetzelfde aan, namelijk 230 Volt. De bronspanning moet daarom gelijk zijn aan 460 Volt.

Stap 5: voer de zoutconcentraties in

Het zeewater voor de Nederlandse kust heeft een zoutconcentratie van 30 g/liter. Voor rivierwater gaan we uit van een zoutconcentratie van 1 g/liter.

De stromen die de vloeistof verlaten, hebben andere zoutconcentraties. Er heeft immers een migratie plaatsgevonden van zout van de zeekamers naar de rivierkamers. Hoeveel dat transport bedraagt hangt af van de tijdsduur dat de vloeistof in de kamers is gebleven en dus van de doorstroomsnelheid van de vloeistof. Wij kiezen hier de concentraties van het uitstromende water en leggen daarmee de doorstroomsnelheid vast. Die zal verderop berekend worden. Voor

de zoutconcentraties in de kamers nemen we het gemiddelde. Dat is wat kort door de bocht maar anders wordt het wel erg ingewikkeld.

Stap 6: Bereken de spanning over een membraan en het aantal membranen van de centrale.

Zoutgehaltes in de kamers en de temperatuur bepalen de spanning over een membraan. Er geldt de wet van Nernst:

$$U_{membraan} = \frac{RT}{zF} \ln\left(\frac{cmz}{cmr} \right)$$

Voor de bronspanning geldt dat die gelijk is aan

$$U_{bron} = Nm * U_{membraan}$$

Hierin is Nm het aantal membranen op een na want de buitenste twee membranen moeten samen doen. De bronspanning (die door de gemaakte keuzes al vast lag) en de membraanspanning (die wordt bepaald door zoutgehaltes en de temperatuur leggen dus vast hoeveel membranen nodig zijn!

Stap 7: Bereken de soortelijke weerstand van rivierwater in de kamers

. Het geleidingsvermogen wordt bepaald door het zoutgehalte. Er geldt dat het specifieke geleidingsvermogen evenredig is met het aantal mol ionen in de oplossing. In formule:

$$\sigma = 4,85 * 2 * \frac{cmr}{58,44}$$

De 2 is nodig omdat zowel Cl^- Als Na^+ aan de geleding bijdragen.

Voor de soortelijke weerstand geldt :

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

Stap 8: Bereken de afmetingen van de membranen en de centrale.

Voor de weerstand van een zoetwaterkamer geldt

$$R_{zwk} = \rho \frac{A}{d}$$

De inwendige weerstand van de centrale wordt voornamelijk bepaald door het rivierwater. Er is voor gekozen om de inwendige weerstand gelijk te maken aan de uitwendige weerstand. Het aantal kamers met rivierwater ligt ook vast. Dus de weerstand van een zoetwaterkamer kan berekend worden door de inwendige weerstand te delen door het aantal rivierkamers.

Blijven over d en A. Hoe dunner de kamer hoe beter. Kies bijvoorbeeld 0,0002 m Tenslotte kan het oppervlak van het membraan worden uitgerekend door gebruik te maken van bovenstaande formule.

Stap 9: Bereken de afmetingen de prestatie en de prijs van de centrale.

De afmetingen van de stapel membranen en waterkamers geldt dat lengte*breedte worden bepaald door het oppervlak van een membraan en dat de hoogte van de stapel wordt bepaald door het aantal membranen + kamers, door de dikte van de membranen en de dikte d. De membranen kunnen tegenwoordig 0,1 mm dik worden gemaakt. Voor een kamer met membraan geldt dus een dikte van 0,3 mm. Samen met het aantal kan de hoogte van de stapel worden bepaald.

De centrale levert een nuttig vermogen mbv membranen die duur zijn. Per m2 wordt nu nog 50 Euro betaald. Het totale membraanoppervlak is te berekenen en daarmee het aantal Watt dat per m2 kan worden geleverd. Hoe hoger de prestatie hoe minder duur de centrale wordt.

Stap 10: Bereken de hoeveelheid rivierwater die per seconde nodig is

De elektrische stroom die aan de gebruiker wordt geleverd is gelijk aan de lading in Coulomb die per s door elk van de membranen loopt. De stroomsterkte is bekend. Dus de ladingstransport door de ionen is ook bekend. Omdat de lading van 1 mol ionen gelijk is aan de constante van Faraday is dus ook bekend hoeveel mol ionen per s door de membranen migreert. Maar dan is ook bekend hoeveel mol zout er per seconde van het zeewater naar het rivierwater gaat. Dus ook is bekend hoeveel gram zout totaal van zee naar rivierwater gaat. Het zoutgehalte in die kamers moet constant blijven. Maar dan staat ook vast hoeveel water vervangen moet worden.

Stel dat de concentratie instromend water 1 g/liter is;

Stel dat de concentratie uitstromend water 7 g/liter is. Dan neemt elke liter water per seconde 6 gram mee. Als er via de membranen 30 g zout elke seconde migreert en de concentraties in de kamers veranderen niet dan moet er wel 5 liter per s langskomen.

Opdracht:

- speel met excelsheet om gevoel te krijgen voor de uitkomsten.
- Begin met een huishouden en ga na of je de prestatieindex (W/m2) maximaal kunt krijgen en welke variabelen daar invloed op hebben.
- Nadat je de productie van de centrale voor een huishouden hebt geoptimaliseerd ga je het aantal huishoudens varieren: wat gebeurt er met de gevraagde hoeveelheid zoet water (Vrin)? Wat gebeurt er
- Maak een input-output-tabel: **verticaal** input: Vrin. **Horizontaal** output: aantal huishoudens dat wordt bediend/kosten centrale/volume van centrale/prestatie-index/aantal kWh dat jaarlijks geleverd wordt/jaarlijkse opbrengsten als 1 kWh € 0,30 moet gaan kosten/zoutgehalte brakke water/watertoevoer naar estuarium per dag.

Bijlage voor de planoloog

Stap 1: Zoeken naar locaties

Zoek in een atlas naar locaties die in aanmerking komen voor de vestiging van een (grote) Blue-Energy-centrale. Maak een lijst van vier potentiële locaties. Zorg voor een kaart en een satellietbeeld van elk van de locaties. Formaat (20 km x 20 km). Maak hiervan kopieën voor de andere experts. Zowel de milieudeskundige als de beleidsadviseur zullen hun kopie zelf komen ophalen tijdens de oriëntatiefase.

Stap 2: Beschrijving locaties: watertoevoer

Maak een schatting van de hoeveelheid aangevoerd zoet water. Ga hiervoor te rade op internet. Wat is het debiet van de betrokken rivier? Welk gedeelte van dit debiet zou maximaal ter beschikking kunnen komen van Blue-Energy? Denk er om dat doorvaart van schepen mogelijk moet blijven!

Stap 3: Beschrijving locaties: woonkernen

Welke woonkernen zijn er aanwezig op het aangegeven gebied (20km bij 20km)? Hoeveel mensen/huishoudens wonen daar? Ga uit van een gemiddeld verbruik van 10 kWh per dag per huishouden en bereken daarmee het gemiddeld jaarlijks huishoudelijk verbruik van elektrische energie voor deze regio.

Stap 4: Beschrijving locaties: industrie

Bevindt er zich op de aangewezen locatie industrie? Zoek op internet of je iets kunt vinden over het gebruik van elektrische energie van de betrokken industrie. Druk dit ook uit in kWh per dag en per jaar.

Stap 5: Beschrijving locaties: landbouw

Wordt er landbouw bedreven in de aangegeven locaties? Wat verbouwen die boeren? Is er sprake van veeteelt?

Stap 6: Beschrijving locaties: natuurgebieden en recreatie

Gaat de centrale ten koste van recreatiemogelijkheden? Bevinden er zich belangrijke natuurgebieden op de locatie? Is er sprake van een estuarium op de

locatie? (Een estuarium is een natuurgebied in de monding van een rivier waar sprake is van brak water).

Stap 7: Beschrijving locaties: maken van een overzicht.

Stel een matrix op waarin je je bevindingen schematisch weergeeft.

Geef in de matrix (bijvoorbeeld met drie kleuren markeerstift aan of genoemde kenmerken pleiten voor vestiging van een centrale (groen), neutraal zijn (geel) of tegen de komst van een centrale pleiten (rood).

Stap 8: overleg met de milieudeskundige

Ga met de milieudeskundige in overleg over de plaats waar de centrale moet komen en met name waar het estuarium moet komen. Teken dit in op de kaarten van de locaties. Is er schade te verwachten aan bestaande natuurgebieden?

Stap 9: overleg met de beleidsadviseur.

Overleg met de beleidsadviseur over de woonkernen in het gebied van de locatie. Moeten er bewoners wijken voor de vestiging van een centrale? Om welke aantallen gaat het?

Is er sprake van grote diversiteit? Bijvoorbeeld stad/dorp. Zijn er strijdige belangen? Is er bij landbouw en industrie sprake van gedupeerden of juist belanghebbenden?

Stap 10: voorkeur vaststellen

Actualiseer je matrix naar aanleiding van de gesprekken met de milieudeskundige en de beleidsadviseur. Stel een SWOT-analyse op voor elk van de locaties.

Bijlage voor de milieudeskundige

Stap 1: Informatie zoeken over estuaria in de wereld

Zoek op internet informatie over estuaria. Wat zijn de kenmerken van een estuarium? Hoe zien ecosystemen van een estuarium er uit? Heeft Nederland estuaria? Waar zijn die te vinden? Wat zijn de kenmerken van deze estuaria? Hoe groot zijn ze? Wat is het zoutgehalte in deze gebieden? Welke soorten komen hier voor?

Stap 2: Beschrijving locatie op de afsluitdijk.

Op de Afsluitdijk bevindt zich een proefcentrale Blue Energy. Het vermogen van deze centrale is niet erg groot. Hij levert ongeveer 24 kWh per dag. (Een huishouden gebruikt ongeveer 10 kWh per dag). Zoek op internet naar satellietbeelden van de centrale en stel vast dat er drie pijpen lopen: twee voor de aanvoer en een voor de afvoer. Waarom is hier geen sprake van een estuarium? Voor een grote centrale, bijvoorbeeld een die 2,4 miljoen kWh moet produceren is Breezanddijk niet echt een goede locatie. Kijk eens naar de mogelijkheden voor een vestiging van zo'n centrale in Friesland. Maak een kopie van de kaart van de locatie (20 km bij 20 km). Waar zou je die centrale dan willen plaatsen? Waar komt dan dat estuarium? Hoeveel groter moeten die pijpen zijn als dat water ook hier via pijpen naar de centrale wordt gebracht?

Stap 3: Onderzoek naar doorstroming

Een meer heeft doorstroming nodig. Anders krijg je stilstaand water en daar komen problemen van. De doorstroming hangt natuurlijk af van de omvang van het meer. Bij een estuarium is dat niet anders. Er is sprake van aanvoer van brak water vanuit de centrale en er moet dus ook afvoer zijn. Hoe groter de aanvoer/afvoer hoe groter het estuarium moet zijn. Wat is het verband tussen die twee? Zoek hier informatie over. Wat is het verband tussen het volume van een meer en het debiet van de doorstroming?

Stap 4: Bezoek aan de planoloog.

Ga langs bij de planoloog. Kijk wat hij/zij inmiddels te weten is gekomen over mogelijke locaties. Mogelijk heeft de planoloog ook zijn oog laten vallen op Friesland. Bespreek de lijst van locaties met het oog op de gevolgen voor de natuurgebieden. Ga na hoe de genoemde locaties scoren als het gaat om verbetering van de kansen op natuurgebied. Stel samen een lijst op van de drie meest geschikte locaties.

Stap 6: Bezoek aan de ingenieur: zoutgehalte

Leg aan de ingenieur de simpele vraag voor. Hoeveel brak water komt er van een centrale die elektriciteit produceert voor 100 duizend huishoudens? Hoe groot is het zoutgehalte van dat brakke water? Kijk over de schouder van de ingenieur mee. Hij kan het zoutgehalte van het uitstromende water kiezen maar dat heeft consequenties voor het functioneren van de centrale. De milieudeskundige heeft een opvatting over het meest wenselijke zoutgehalte maar het uitstromende water kan altijd nog gemixed worden zeewater of rivierwater om het gewenste zoutgehalte te krijgen.

Stap 8: Bezoek aan de ingenieur: calamiteiten risico

Als de membranen in een compartiment scheuren kan er zomaar zeewater in de afstroom van het brakke water terechtkomen. Leg aan de ingenieur de vraag voor of het mogelijk is in plaats van een grote centrale 10 kleine te bouwen met hetzelfde resultaat.

Stap 9:   Opstellen SWOT-analyse

Maak voor alle locaties die je van de planoloog hebt gekregen, alsook van de locatie van Friesland een SWOT-analyse. Kijk alleen naar aspecten die te maken hebben met de biodiversiteit.

Bijlage voor de beleidsadviseur

Stap 1: Informatie zoeken grote infrastructurele projecten

Zoek op internet informatie over grote infrastructurele projecten. Zoek bij elk van die projecten op hoe lang de periode duurt van voornemen tot voorstel, van voorstel tot eerste paal, van eerste paal tot oplevering.

Stap 2: Beschrijving valkuilen bij grote infrastructurele projecten

Soms gaat het fout bij grote projecten. Dan wordt die weg nooit afgebouwd of het project wordt opgeleverd maar het voldoet niet aan de verwachtingen (Betuwelijn). Zoek informatie over deze mislukkingen. Zoek ook informatie over projecten die nooit zijn toegekomen aan de eerste paal. Zoek ook daar voorbeelden van.

Stel een lijst op van mogelijke valkuilen waar je op moet letten bij besluitvorming, planning, aanbesteding en uitvoering van grote projecten.

Stap 3: locatie op de afsluitdijk.

Op de Afsluitdijk bevindt zich een proefcentrale Blue Energy. Het vermogen van deze centrale is niet erg groot. Hij levert ongeveer 24 kWh per dag. (Een huishouden gebruikt ongeveer 10 kWh per dag). Zoek op internet naar satellietbeelden van de centrale en stel vast dat er drie pijpen lopen: twee voor de aanvoer en een voor de afvoer. Waarom is hier geen sprake van een estuarium? Voor een grote centrale, bijvoorbeeld een die een miljoen kWh moet produceren, is Breezanddijk niet echt een goede locatie. Kijk eens naar de mogelijkheden voor een vestiging van zo'n centrale in Friesland bij Kornwernerzand. Maak een kopie van de kaart van de locatie. Zorg dat Leeuwarden nog net op de kaart staat. Waar zou je die centrale dan willen plaatsen? Hoeveel groter moet de diameter van die pijpen zijn als dat water ook hier via pijpen naar de centrale wordt gebracht? Hoeveel huishoudens kunnen worden voorzien met de centrale? Welke huishoudens zouden dat moeten worden?

Stap 4: Opzetten van een plan van besluitvorming.

Stel dat de locatie inderdaad Kornwernerzand zou worden: welke gemeenten krijgen daarmee te maken? Hoe zouden de bewoners in de regio hiermee te maken krijgen. Wat zijn de voordelen en de nadelen of verschilt dat per gemeente? Waar moet de definitieve beslissing worden genomen? In de

provincie of bij de betrokken gemeentes? Zou Kornwernerzand een definitieve inspraak (moeten) hebben? Waarom wel/niet?

Stap 5: Bezoek aan de planoloog.

Ga langs bij de planoloog. Kijk wat hij/zij inmiddels te weten is gekomen over mogelijke locaties. Mogelijk heeft de planoloog ook zijn oog laten vallen op Friesland. Bespreek de lijst van locaties met het oog op de gevolgen voor de inwoners. Natuurlijk is gebruik maken van de bestaande infrastructuur een pre. Ga na hoe de genoemde locaties scoren als het gaat om de regionale energievoorziening. Liggen er bestaande elektriciteitscentrales in de genoemde regio? Aan wie leveren die elektriciteit? Kan een grote centrale goede diensten bewijzen?

Stap 6: Bezoek aan de milieudeskundige.

Inmiddels zal de milieudeskundige ook wel beschikken over de lijst van locaties van de planoloog. Jij als beleidsadviseur moet kijken of er veel verzet valt te verwachten van milieuorganisaties. Sowieso is het handig om deze organisaties in een vroeg stadium te betrekken bij de besluitvorming. Met de milieudeskundige overleg je wat de voor- en nadelen zijn van elke locatie op natuurgebied.

Stap 8: Bezoek aan de ingenieur:

Je laat je door de ingenieur uitleggen hoe zijn model werkt. Jij wilt weten hoe de ingenieur tot zijn keuzes komt. Ook wil je een idee hebben van mogelijke calamiteiten die zich in de toekomst kunnen voordoen. Leg aan de ingenieur de vraag voor of het mogelijk is in plaats van een grote centrale 10 kleine te bouwen met hetzelfde resultaat.

Stap 9: Opstellen SWOT-analyse

Maak voor alle locaties die je van de planoloog hebt gekregen, alsook van de locatie van Friesland een SWOT-analyse. Kijk vooral naar aspecten die te maken hebben met het draagvlak, de politieke besluitvorming en het publieke belang.

Stap 10: Een voorlopig voorstel

Jij hebt de eindverantwoordelijkheid voor het uit te brengen rapport. Je hebt met alle betrokkenen gesproken en je hebt een aardig idee hoe de vlag er bij hangt. Stel alvast een voorlopig rapport op. Wat de bijlagen van de andere experts betreft: je wilt hebben dat die kort, bondig en duidelijk zijn. Bedenk alvast hoe jij

wilt dat die bijdragen er uit zien. Na de laatste bijeenkomst maak je het definitieve rapport.

Stap 11: de presentatie

Jij verzorgt de presentatie. Je laat door de andere experts 1-2 dia’s maken om hun bijdrage zichtbaar te maken. Je maakt de ppt tot een geheel en je draait een keer proef met je team.

Bijlage 1 URL-lijst

URL1 http://www.voetafdruk.nl

Test de grootte van je voetafdruk.

URL2 https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/2018/04/12/video/

URL3 https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/2018/04/12/video/

URL4 Blue Energy centrale in Katwijk
https://www.stichtingmilieunet.nl/andersbekekenblog/energie/blue-energy-democentrale-in-katwijk-duurzame-energie-opwekken-uit-zoet-en-zout-water.html

URL5 https://www.youtube.com/watch?v=bTTeKP1nRm8

Bijlage 2 Figuurlijst

Voorpagina:

Artist Impression Blue Energy Centrale – Wetsus

Inleiding

Hoofdstuk 1:

Hoofdstuk 2: